



Renato Barateiro Janela Veríssimo

Licenciado em Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

**Ferramenta para estudar os impactos
dos edifícios nZEB na rede de
distribuição de energia elétrica**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Eletrotécnica e de Computadores

Orientador: Prof. Doutor João Francisco Alves Martins,
FCT-UNL

Co-orientador: Prof. Doutor Rui Miguel Amaral Lopes,
FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof.^a, Dr.^a. Maria Helena Silva Fino
Arguente(s): Prof. Dr. Pedro Miguel Ribeiro Pereira
Vogal(ais): Prof. Dr. Rui Miguel Amaral Lopes



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Setembro, 2018

Ferramenta para estudar os impactos dos edifícios nZEB na rede de distribuição elétrica

Copyright © Renato Barateiro Janela Veríssimo, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Nova de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

Para os meus Avós.

Agradecimentos

Em primeiro lugar gostaria de agradecer ao Professor Doutor João Martins pela disponibilidade, por todo o apoio demonstrado e pelo conhecimento científico transmitido no decorrer desta dissertação. Gostaria também de agradecer ao Professor Doutor Rui Lopes por toda a confiança, motivação, apoio científico e disponibilidade que sempre demonstrou, em qualquer altura. O meu profundo e sincero obrigado.

Gostaria igualmente de agradecer à Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa por toda a formação académica, bem como a todos os professores, pelo conhecimento transmitido que em muito contribuiu para o meu crescimento intelectual e profissional.

A todos os meus colegas de faculdade e amigos, com os quais partilhei estes anos académicos, sem vocês não era possível. Agradeço, em especial, ao Alexandre Inácio, David Torrado, João Neves, Ricardo Santos (obrigado por tudo!), Rui Pacheco e Vítor Rodrigues. Obrigado por toda a amizade e pelos bons momentos proporcionados, que irei guardar para sempre.

Aos meus amigos de longa data que sempre me acompanharam ao longo de toda a minha vida e estão sempre presentes. Obrigado Afonso Chanoca, André Candeias, André Filipe, André Najovite, Bruno Casaca, David Cagica, Tiago Neto e Tomás Gronita. Não existem palavras para vos descrever, obrigado por tudo.

A toda a minha família, em especial aos meus Pais, Avós, Irmã e Sobrinho, por todo o amor incondicional e apoio demonstrado em todas as etapas da minha vida. Sem vocês nada disto seria possível. Fizeram de mim a pessoa que sou hoje. Gostaria de manifestar o meu especial agradecimento ao meu Avô Alípio Veríssimo, queria que estivesse aqui comigo para partilharmos este momento.

Por último, à Sara Vagarinho. Por todo o amor, por seres única e me mostrares que as coisas mais simples da vida são as mais extraordinárias. A vida contigo tem outra cor. Obrigado por tudo.

Resumo

O crescimento do consumo energético a nível mundial origina preocupações relacionadas com a escassez dos recursos energéticos e com os impactos ambientais provenientes da utilização destes recursos. A interação do ser humano com o planeta tem originado a degradação e poluição do mesmo, através da libertação de gases com efeito de estufa para a atmosfera, o que resulta no aumento da temperatura da terra e, consequentemente, no aquecimento global. Os edifícios são responsáveis por uma porção considerável do consumo de energia, tornando-se assim indispensável a melhoria da eficiência energética dos mesmos para a concretização de quaisquer metas para a energia e clima.

É neste contexto que surgem os edifícios nZEB, ou edifícios com necessidades quase nulas de energia. Estes edifícios têm um elevado desempenho energético e a satisfação das suas necessidades de energia resulta em grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, preferencialmente produzida no local ou nas proximidades.

A Diretiva 2010/31/EU do Parlamento Europeu estabeleceu que os Estados-Membros de cada país devem assegurar que: a) após 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia; b) após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia.

Contudo, a integração de edifícios nZEB pode originar impactos negativos nas redes de distribuição de energia elétrica, devido à predominância do trânsito de energia no sentido inverso de elevada amplitude. O trabalho descrito nesta dissertação consiste no desenvolvimento de uma ferramenta automática que permite quantificar alguns destes impactos na rede.

Palavras-chave: Eficiência Energética, Edifícios nZEB, Rede de Distribuição Elétrica, Geração Distribuída.

Abstract

The worldwide energetic consumption growth leads to concerns regarding energetic resources scarcity and environmental impacts due to the use of these resources. Human interaction with the planet has originated its degradation and pollution through the release of greenhouse gases to the atmosphere, which increases the temperature level of the Earth and, consequently, the global warming. Since buildings are responsible for a considerable amount of energy consumption it is imperative to improve their energy efficiency in order to achieve any goals for energy and climate.

This is why nZEB buildings, or nearly Zero-Energy Buildings, will play a major role in the improvement of energy efficiency in Europe. These buildings have a very high energy performance and their needs should be mainly covered by energy from renewable sources, including renewable energy produced on-site or nearby.

The Directive 2010/31/EU of the European Parliament has established that Member States of each country shall ensure that: a) after 31 December 2020, all new buildings are nearly Zero-Energy Buildings; b) after 31 December 2018, new buildings occupied and owned by public authorities are Nearly Zero Energy Buildings.

However, integrating nZEB buildings may cause negative impacts on electric distribution grids, due to higher values of reverse power flow. The work described in this dissertation refers to an automatic tool that quantifies some of these impacts on the grid.

Palavras-chave: Energy Efficiency, nZEB buildings, Electric Distribution Network, Generated Distribution.

Tabela de Conteúdos

1. Introdução	1
1.1 – Enquadramento e motivação	1
1.1.1 – Conceito nZEB (<i>nearly Zero-Energy Building</i>)	3
1.1.1.1 – Para atingir nZEB	4
1.1.1.2 – Edifícios nZEB num contexto mundial	5
1.1.1.3 – O exemplo do Solar XXI	6
1.1.2 – Flexibilidade, o próximo passo para os nZEB	7
1.1.3 – Possíveis problemas provenientes da integração de edifícios nZEB em redes de distribuição elétrica de baixa tensão	8
1.2 – Objetivos	9
1.3 – Estrutura do documento	10
2. Estado da Arte	11
2.1 – Integração de edifícios nZEB na rede de distribuição	11
2.1.1 – Desempenho da rede de distribuição de energia elétrica	12
2.1.2 – Perdas energéticas	13
2.1.3 – Sobrecarga	16
2.1.4 – Perfil de tensão	18
2.2 – Ferramentas de análise de sistemas de potência já existentes	20
2.3 – Discussão	23
3. Solução Proposta	27
3.1 – Modelo Funcional	27
3.1.1 – Página inicial	28
3.1.2 – Informação base do projeto	29
3.1.3 – Cargas nos barramentos	30
3.1.4 – Linhas	30
3.1.5 – Cargas	30
3.1.6 – Execução	32
3.1.7 – Resultados	32

3.2 – Modelo Arquitetural.....	33
3.2.1 – Dados	33
3.2.2 – Interface	34
3.2.3 – Computação	35
3.2.4 – Entidade	35
3.3 – Implementação	36
3.3.1 – Tecnologia utilizada	36
3.3.2 – Detalhe do Modelo Arquitetural.....	37
3.3.2.1 – Gestão de Dados Personalizados (GDP)	37
3.3.2.2 – Gestão de Entidades Externas (GEE)	39
3.3.2.3 – Interface com o Utilizador (IU)	43
3.3.2.4 – Interface com os Dados Personalizados (ID)	49
3.3.2.5 – Interface com as Entidades Externas (IE).....	51
3.3.2.6 – Tratamento de Dados (TD).....	55
3.3.2.7 – Trânsito de Potência (TP).....	61
3.3.2.8 – Cálculo de Resultados (CR)	63
3.3.2.9 – Gestão de Projetos (GP)	64
4. Caso de Estudo.....	65
4.1 – Cenários	65
4.2 – Rede de distribuição de Baixa Tensão	71
4.3 – Resultados	72
4.3.1 – Perfil diário de carga.....	72
4.3.2 – Pico de potência.....	74
4.3.3 – Perdas por efeito de Joule	76
4.3.4 – Perfil de tensão	79
4.4 – Discussão	81
5. Conclusões e trabalhos futuros.....	83
5.1 – Síntese	83
5.2 – Contribuições	84
5.3 – Trabalhos futuros	85
Bibliografia	87
Anexo I	91

Anexo II.....	99
----------------------	-----------

Lista de Figuras

Figura 1. 1 - Edifícios nacionais classificados por período de construção [6]	2
Figura 1. 2 - Performance energética dos edifícios nacionais por período de construção [6]	3
Figura 1. 3 - Caminho dos edifícios de modo a atingirem o conceito nZEB [13].....	5
Figura 1. 4 - Mapa com a localização dos edifícios nZEB no mundo [14]	6
Figura 1. 5 - Solar XXI: Energia elétrica consumida/produzida por mês, no ano 2011. Adaptado de [12]	7
Figura 1. 6 - Sistemas fotovoltaicos no parque e fachada do edifício Solar XXI [16].....	7
Figura 1. 7 - Integração de edifícios nZEB na RDBT	9
Figura 2. 1 - Variação do desempenho da rede em função da quantidade de GD introduzida. Adaptado de [22]	13
Figura 2. 2 - Valor médio de perdas de potência ativa por potência ativa média de saída da GD. Adaptado de [25].....	15
Figura 2. 3 - Perdas anuais de energia por efeito de Joule em função do nº de edifícios convertidos para nZEB. Adaptado de [11]	16
Figura 2. 4 - Perfil médio diário de carga anual na saída do transformador de uma RDBT em função do nº de edifícios convertidos para nZEB. Adaptado de [11]	17
Figura 2. 5 - Valor médio do pico de potência diário em função do nº de edifícios convertidos para nZEB. Adaptado de [11]	18
Figura 2. 6 - Perfil de tensão numa residência antes e depois de 50% das casas presentes na mesma RDBT terem sido equipadas com sistemas fotovoltaicos. Adaptado de [23]	19

Figura 2. 7 - Tensão em cada nó em dois instantes de tempo diferentes, quando são convertidos 33 edifícios para nZEB. Adaptado de [11]	20
Figura 2. 8 - Representação gráfica de uma rede de distribuição elétrica. Ferramenta: PSS/E [33]	25
Figura 3. 1 - Diagrama de casos de uso	28
Figura 3. 2 - Controlo para a criação e abertura de projetos	29
Figura 3. 3 - Introdução de um diagrama de carga num barramento escolhido	31
Figura 3. 4 - Introdução de geração fotovoltaica num barramento escolhido	32
Figura 3. 5 - Arquitetura da nZEBt.....	33
Figura 3. 6 - Módulo Gestão de Dados Personalizados (GDP)	38
Figura 3. 7 - Formulário para introdução de dados de carga e da rede	38
Figura 3. 8 - Saída do PVGIS em ficheiro de texto	40
Figura 3. 9 - Arquitetura do modelo de demanda de eletricidade. Adaptado de [35]. ...	41
Figura 3. 10 - Exemplo de saída do modelo de Richardson (um edifício, dia de inverno). Adaptado de [35].	42
Figura 3. 11 - Opção File.....	43
Figura 3. 12 - Janela proveniente da opção Settings	44
Figura 3. 13 - Janela proveniente da opção Help	44
Figura 3. 14 - Interface gráfica da ferramenta, separador BUS.....	45
Figura 3. 15 - Interface gráfica da ferramenta, separador Branches.....	46
Figura 3. 16 - Interface gráfica da ferramenta, separador Load	48
Figura 3. 17 - Janela de controlo Loads Introduced	48
Figura 3. 18 - Interface gráfica da ferramenta, separador Power Flow	49
Figura 3. 19 - Fluxograma do módulo IP	50

Figura 3. 20 - Mensagens de operação bem-sucedida ao introduzir dados personalizados	51
Figura 3. 21 - Fluxograma da Interface com o modelo de Richardson, módulo IE	52
Figura 3. 22 - Mensagem de operação bem-sucedida ao introduzir uma carga pelo modelo de Richardson	52
Figura 3. 23 - Fluxograma da Interface com a ferramenta PVGIS, módulo IE.....	54
Figura 3. 24 - Procedimento Potência Reativa	55
Figura 3. 25 - Algoritmo implementado para cálculo de potência reativa em cada instante	56
Figura 3. 26 - Instantes resultantes das médias efetuadas, por hora.....	56
Figura 3. 27 - Método 1_15 Richardson.....	56
Figura 3. 28 - Método de regressão linear	57
Figura 3. 30 - Método 1_15 PVGIS	58
Figura 3. 31 - Método PVGIS_Potência.....	58
Figura 3. 32 - Algoritmo implementado para o cálculo da potência fotovoltaica produzida em cada instante, para cada edifício	61
Figura 3. 33 - Modelo Trânsito Potência.....	62
Figura 3. 34 - Algoritmo implementado para a obtenção do trânsito de potência	63
 Figura 4. 1 - Dados de entrada de irradiância global.....	 66
Figura 4. 2 - Dados de entrada de temperatura média	67
Figura 4. 3 - Consumo de energia utilizado para aquecimento interior, por fonte de energia. Adaptado de [40]	67
Figura 4. 4 - Consumo de energia utilizado para aquecimento de águas, por fonte de energia. Adaptado de [40]	68
Figura 4. 5 - Rede de distribuição de Baixa Tensão considerada para o estudo	72

Figura 4. 6 - Perfil diário de carga médio da rede de distribuição de Baixa Tensão para ambos os cenários.....	73
Figura 4. 7 - Perfil diário de carga médio da rede de distribuição de Baixa Tensão (Cenário 1) e Potência fotovoltaica média gerada ao longo de um dia.	74
Figura 4. 8 - Pico de potência no nó de saída do transformador em função do número de edifícios convertidos em nZEB	75
Figura 4. 9 - Perdas anuais de energia por efeito de Joule: Resolução de 1 minuto (a) e resolução de 15 minutos (b)	76
Figura 4. 10 - Perdas anuais de energia por efeito de Joule em função do número de edifícios convertidos para nZEB	77
Figura 4. 11 - Perdas de energia por efeito de Joule em função do mês do ano.....	78
Figura 4. 12 - Perdas de Potência Ativa para um dia típico do mês de Julho	79
Figura 4. 13 - Valor máximo de tensão por mês	79
Figura 4. 14 - Perfil de tensão da rede de distribuição às 12:45h, no mês de Agosto	80

Lista de Tabelas

Tabela 2. 1. Impacto da energia solar fotovoltaica nas perdas de potência ativa numa RDBT [23].....	14
Tabela 2. 2. Perdas numa RDBT combinando CHP e energia solar fotovoltaica [24] ..	14
Tabela 2. 3. Comparação entre ferramentas existentes no mercado e a ferramenta nZEBt	26
Tabela 4. 1. Equipamentos elétricos considerados no estudo.....	69
Tabela 4. 2. Posição de cada edifício na rede de distribuição, número de residentes e consumo anual de energia.....	70
Tabela 4. 3. Parâmetros considerados para a obtenção da potência de pico	71
Tabela 4. 4. Características da linha de distribuição	72
Tabela 4. 5. Pico de potência no transformador de distribuição em cada mês, para ambos os cenários, e respectivos instantes (resolução de 1 minuto)	75
Tabela 4. 6. Valor, mês e instante do pico de potência no transformador para ambos os cenários e resoluções	76
Tabela 4. 7. Valor mensal das perdas de energia e variação referente ao Cenário 1 (resolução de 1 minuto)	78
Tabela 4. 8. Valor máximo de tensão por mês e instante do dia	80

Acrónimos

Simbologia

AC	<i>Alternating current</i>
API	<i>Application Programming Interface</i>
AZEB	<i>Autonomous Zero Energy Building</i>
BT	Baixa-Tensão
CHP	Co-geração
CR	Cálculo de resultados
DC	<i>Direct current</i>
DCU	Diagrama de casos de uso
GD	Geração distribuída
GDP	Gestão de dados personalizados
GEE	Gestão de entidades externas
GP	Gestão de projetos
HTTP	<i>Hypertext Transfer Protocol</i>
ID	Interface com os dados personalizados
IE	Interface com entidades externas
IU	Interface com o utilizador
MT	Média-Tensão
Net-ZEB	<i>Net Zero-Energy Building</i>
NOCT	<i>Nominal Operating Cell Temperature</i>
nZEB	<i>nearly Zero-Energy Building</i>
nZEBt	<i>nZEB Tool</i>

PVGIS	<i>Photovoltaic Geographical Information System</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
TD	Tratamento de dados
TP	Trânsito de potência
UE	União Europeia
UPAC	Unidade de produção de autoconsumo
URI	<i>Uniform Resource Identifier</i>

Introdução

O enquadramento do trabalho desenvolvido é apresentado neste capítulo, bem como a motivação para o mesmo. Esta secção aborda a importância do perfil energético dos edifícios no contexto europeu, apresenta dados referentes ao panorama nacional e introduz o conceito nZEB, bem como os possíveis problemas resultantes da integração destes edifícios numa rede de distribuição de energia elétrica de Baixa-Tensão (RDBT). Seguidamente apresentam-se os objetivos que guiam o desenvolvimento da ferramenta proposta neste trabalho e, por último, a estrutura do documento.

1.1 – Enquadramento e motivação

Nos últimos anos a temática da sustentabilidade tem adquirido uma importância bastante significativa na Europa e no mundo [1]. O facto do ser humano interagir com o planeta leva, indubitavelmente, a alterações climáticas que podem ser prejudiciais para o meio ambiente, originando a degradação e poluição do mesmo [2]. De um ponto de vista económico é também importante reduzir os custos de produção de energia, assim como aumentar a autonomia e segurança energética.

Os edifícios representam 40% do consumo de energia total na União Europeia (UE). O sector está em expansão, pelo que será de esperar um aumento constante do consumo de energia por parte dos edifícios. Por conseguinte, a redução do consumo de energia e a utilização de energia proveniente de fontes renováveis nos edifícios constituem medidas importantes necessárias para reduzir a dependência energética da UE e as emissões de gases com efeito de estufa. Conjugadas com uma utilização de energia proveniente de fontes renováveis, as medidas tomadas para reduzir o consumo de energia permitirão à

UE cumprir o Protocolo de Quioto à Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre as Alterações Climáticas [3] e honrar o seu compromisso a longo prazo de manter a subida da temperatura global abaixo dos 2°C e o seu compromisso de, até 2020, reduzir as emissões globais de gases com efeito de estufa em pelo menos 20 % em relação aos níveis de 1990 e em 30% no caso de se alcançar um acordo internacional [4].

É neste contexto que surgem os edifícios nZEB (*nearly Zero-Energy Building*) ou edifícios com necessidades quase nulas de energia. Os Estados Membros asseguram que: a) após 31 de Dezembro de 2020, todos os edifícios novos sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia; b) após 31 de Dezembro de 2018, os edifícios novos ocupados e detidos por autoridades públicas sejam edifícios com necessidades quase nulas de energia [4].

Os edifícios são responsáveis por 36% das emissões de dióxido de carbono (CO₂) na UE. Atualmente, cerca de 35% dos edifícios da UE têm mais de 50 anos de idade. Ao melhorar a eficiência energética dos edifícios, é possível reduzir o consumo energético total da UE em 5% a 6% e diminuir as emissões de dióxido de carbono CO₂ em cerca de 5% [5]. A Figura 1.1 apresenta os edifícios residenciais nacionais, classificados pelos períodos de construção onde se verifica que aproximadamente 50% das moradias foram construídas antes de 1990, indicando o potencial que estes edifícios têm para renovação e melhoria da eficiência energética.

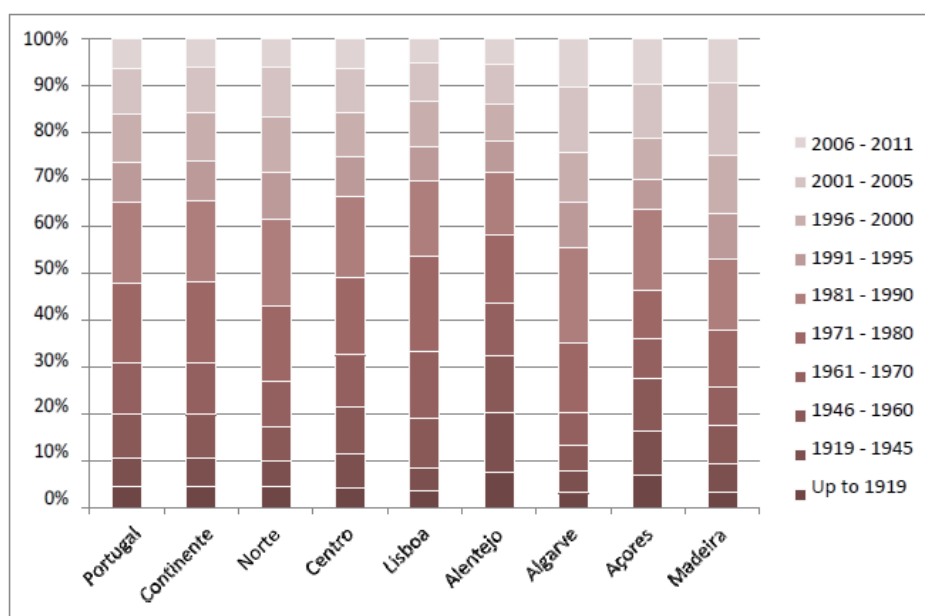


Figura 1. 1 - Edifícios nacionais classificados por período de construção [6]

As primeiras iniciativas legislativas referentes ao controlo climático dos sistemas de energia começaram na década de noventa [6] e culminaram, mais recentemente, no Decreto de Lei Nº 118/2013 de Agosto de 2013 [7], que reúne todas as matérias sobre a performance energética dos edifícios. A implementação desta legislação resultou numa melhoria significativa da performance energética dos edifícios nacionais nos últimos 25 anos, desde a publicação da primeira regulação em 1990 [6]. Na Figura 1.2 é apresentada a performance energética dos edifícios Portugueses por período de construção, até ao ano de 2013.

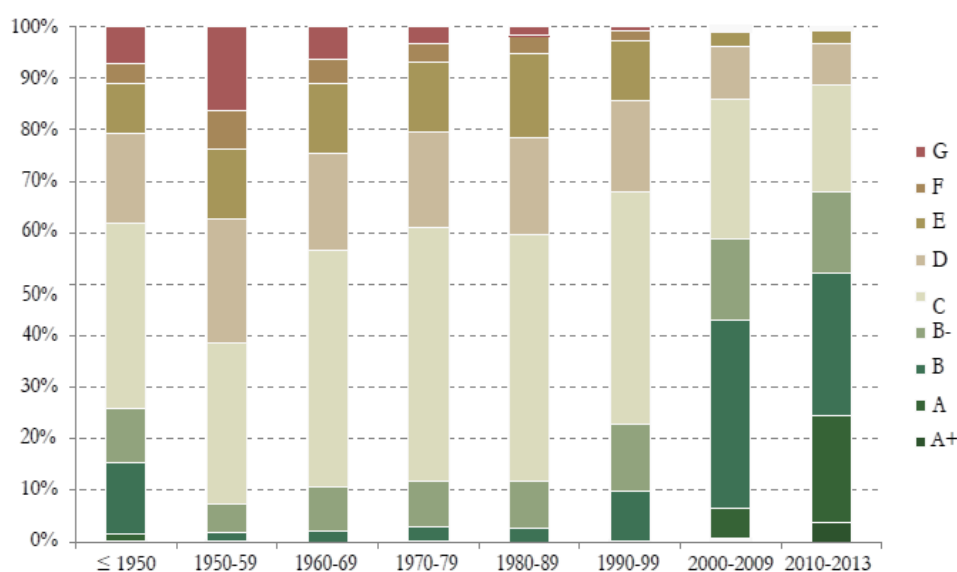


Figura 1. 2 - Performance energética dos edifícios nacionais por período de construção [6]

1.1.1 – Conceito nZEB (*nearly Zero-Energy Building*)

A definição detalhada de nZEB – cuja responsabilidade foi atribuída aos Estados-Membros pela lei comunitária – ainda é vaga em muitos países. Um estudo do *Buildings Performance Institute Europe* (BPIE) [8], realizado em 2015, mostra que metade dos países da UE ainda não tinham apresentado a sua definição. No caso português, o Decreto-Lei nº 118/2013 estabeleceu que são edifícios com necessidades quase nulas de energia os que tenham um elevado desempenho energético e em que a satisfação das necessidades de energia resulte em grande medida de energia proveniente de fontes renováveis, designadamente a produzida no local ou nas proximidades [9].

Edifícios nZEB equipados com sistemas de geração de energia capazes de satisfazer completamente as suas necessidades energéticas podem ser definidos como Autonomous Zero Energy Buildings (AZEBS) ou *Net Zero Energy Building* (Net-ZEB) [10]. Ambos

os conceitos representam edifícios eficientes energeticamente, com possibilidade de gerar energia local, tipicamente através de fontes renováveis, para compensar a sua procura de energia. A diferença entre um e outro consiste na escala de tempo em que esta compensação é atingida. Os edifícios AZEB são completamente autónomos, isto é, não estão ligados à rede de distribuição elétrica, utilizando geração local e sistemas de armazenamento para compensar instantaneamente a sua procura de energia. Por outro lado, os edifícios Net-ZEB, estão ligados à rede de distribuição e contêm sistemas de geração de energia local que lhes permitem compensar o consumo de energia num específico período de tempo (tipicamente um ano) [11].

Num contexto onde o autoconsumo é permitido, se um edifício, em dado instante, fornece energia à rede de distribuição de energia elétrica, significa que, no instante considerado, a geração neste edifício excede o consumo. Do lado da unidade de produção de autoconsumo (UPAC), a energia pode, por exemplo, ser convertida em energia elétrica através das tecnologias solar fotovoltaica e eólica ou convertida em energia térmica através da energia solar. Esta geração pretende responder à procura de energia solicitada pelo edifício para efeitos sobretudo de aquecimento e arrefecimento interior, iluminação, aquecimento de águas e alimentação dos equipamentos. Para converter um edifício convencional em nZEB é necessário, em primeiro lugar, otimizar o perfil energético do mesmo, através de estratégias e tecnologias que visam reduzir as suas necessidades energéticas.

1.1.1.1 – Para atingir nZEB

De acordo com Sartori *et al.* [10] para um edifício alcançar a topologia nZEB, existem, essencialmente, dois passos a cumprir. Numa primeira instância é necessário reduzir as necessidades energéticas do edifício, aumentando assim a sua eficiência energética. Para tal, existem várias estratégias e tecnologias que podem ser utilizadas para atingir esta melhoria, como por exemplo a otimização térmica da estrutura do edifício e a otimização dos ganhos solares, feita através de uma orientação adequada do edifício, que permite absorver diretamente a energia solar, fornecendo calor e luz natural ao mesmo. Estratégias de ventilação natural são, normalmente, implementadas e podem representar uma redução significativa do consumo de energia [12].

O segundo passo consiste na implementação de geração de energia através da integração de fontes renováveis, que permitem a produção local de energia. Os sistemas

de produção de energia podem derivar de qualquer fonte de energia renovável, sendo a solar fotovoltaica e a eólica as mais comuns [14].

A Figura 1.3 apresenta o caminho de um edifício já existente corrente para atingir o conceito nZEB.

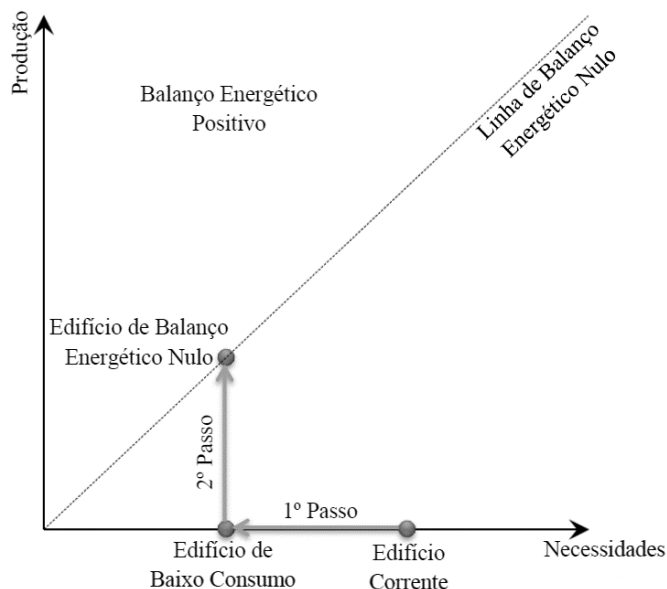


Figura 1. 3 - Caminho dos edifícios de modo a atingirem o conceito nZEB [13]

1.1.1.2 – Edifícios nZEB num contexto mundial

No domínio dos edifícios nZEB, tem havido, na última década, uma proliferação nos projetos de construção. Embora a predominância destes edifícios ocorra maioritariamente na Europa, devido à diretiva implementada pela UE, existem também outros exemplos um pouco por toda a parte do mundo. Um registo de 2013[14] faz referência a mais de 330 edifícios nZEB em todo o mundo, notando-se uma crescente incidência destes edifícios nos Estados Unidos da América e no Canadá. Na Figura 1.4 é apresentado o mapa com a localização dos edifícios nZEB no mundo, em 2013.

A maioria dos projetos realizados na Europa e por todo o mundo consistem em moradias unifamiliares. Visto que estas apresentam um elevado rácio de área de superfície por volume, têm disponível uma superfície que permite absorver radiação solar. A zona do telhado, normalmente inclinada, é suficiente para a integração da capacidade fotovoltaica necessária, bem como para os sistemas térmicos solares. Portanto, pode-se concluir que é relativamente fácil para um edifício atingir o conceito nZEB em termos técnicos, no entanto o custo pode, por vezes, ser bastante elevado [15].



Figura 1. 4 - Mapa com a localização dos edifícios nZEB no mundo [14]

1.1.1.3 – O exemplo do Solar XXI

O Solar XXI é um exemplo de nZEB em Portugal. Construído em 2006, no Campus do Lumiar do Laboratório Nacional de Energia e Geologia (LNEG), pretende ser um exemplo de edifício com baixas necessidades energéticas, sendo estas supridas por produção de energia local [12].

O edifício contém, na totalidade, 326 módulos fotovoltaicos instalados. Estes módulos estão integrados na fachada do edifício, e nos parques de estacionamento dos carros, com uma potência de pico instalada de 12 e 18 kW, respetivamente. As tecnologias utilizadas nas células fotovoltaicas são o silício policristalino, silício amorfo e o CIS (cobre, índio, selénio) de filme-fino. Uma análise efetuada em 2011 demonstrou que o edifício teve um consumo anual de energia de 36 MWh e uma produção local de energia de quase 38 MWh, gerada através dos sistemas fotovoltaicos implementados [12]. A distribuição mensal de energia consumida e produzida pelos sistemas fotovoltaicos (fachada do edifício e parques), no ano de 2011, está representada na Figura 1.5.

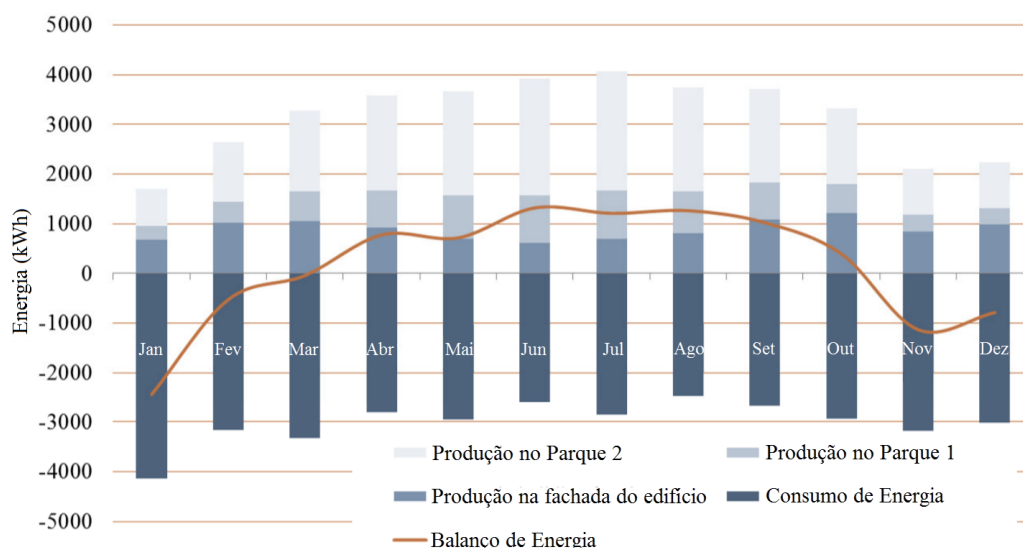


Figura 1. 5 - Solar XXI: Energia elétrica consumida/produzida por mês, no ano 2011. Adaptado de [12]

Na Figura 1.6 é possível observar os sistemas fotovoltaicos implementados num dos parques de estacionamento e na fachada do edifício Solar XXI.



Figura 1. 6 – Sistemas fotovoltaicos no parque e fachada do edifício Solar XXI [16]

1.1.2 – Flexibilidade, o próximo passo para os nZEB

Com a evolução dos edifícios torna-se indispensável a sua inclusão numa realidade cada vez mais inteligente, adaptativa e flexível, na qual a interação com a rede de distribuição desempenha um papel importante. A flexibilidade no sistema elétrico é, geralmente, introduzida através da geração, por parte das grandes centrais térmicas. No entanto, aumentar a flexibilidade do sistema elétrico, tirando vantagem de medidas de

*demand response*¹ nos edifícios, e gerar energia através de recursos renováveis é fundamental para um desenvolvimento sustentável [18].

A flexibilidade energética nos edifícios vai desempenhar um importante papel para facilitar sistemas elétricos inteiramente baseados em fontes de energia renováveis, visto que existem nos edifícios muitos elementos que podem ser flexíveis energeticamente. Desta forma, controlar o consumo doméstico de energia, para que este corresponda aos instantes em que existe geração local, é uma das potencialidades dos edifícios flexíveis do ponto de vista energético [9].

Os sistemas de controlo para implementar estes mecanismos de resposta às necessidades energéticas necessitam de quantificar a flexibilidade dos respetivos edifícios. Uma revisão de literatura que apresenta metodologias utilizadas para quantificar a flexibilidade energética dos edifícios pode ser consultada em [19].

1.1.3 – Possíveis problemas provenientes da integração de edifícios nZEB em redes de distribuição elétrica de baixa tensão

Nas redes de distribuição de energia elétrica sem Geração Distribuída (GD), o trânsito de energia transita do transformador de distribuição para os consumidores, fornecendo energia a estes. A integração de edifícios nZEB nas redes de distribuição BT pode alterar este paradigma e, como resultado, alguns problemas podem advir desta mudança. Assim, dependendo do número de edifícios convertidos em nZEB, os sistemas de geração local nestes instalados podem ter um impacto positivo ou negativo na RDBT. Os impactos na rede podem ocorrer em termos de potência de pico no transformador, sobrecargas nos troços da rede, perfil de tensão e perdas energéticas.

Num contexto nZEB, os edifícios passam de simples consumidores de energia a produtores, sendo assim, além de poderem satisfazer as suas próprias necessidades energéticas, podem ainda abastecer a rede elétrica. Como na maioria dos casos, os períodos de geração de energia local, por parte dos edifícios, não correspondem aos períodos em que se verificam as necessidades energéticas, desequilíbrios importantes podem surgir quer do lado dos edifícios, quer do lado das redes de abastecimento [20].

¹ O conceito de *demand response* consiste numa modificação do habitual perfil de consumos, normalmente como reação aos diferentes preços da eletricidade [17]

Com o crescimento exponencial dos nZEB que se antevê, imposto pela Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu, as consequências podem ser nefastas para as redes de distribuição elétrica. Em determinados instantes do dia, em que a geração de energia excede o consumo, os edifícios alimentam a rede de distribuição de energia elétrica, o que pode causar graves impactos na mesma [21]. Desta forma, o trânsito de potência poderá passar a transitar no sentido inverso (sentido BT-MT), como é apresentado no exemplo da Figura 1.7.

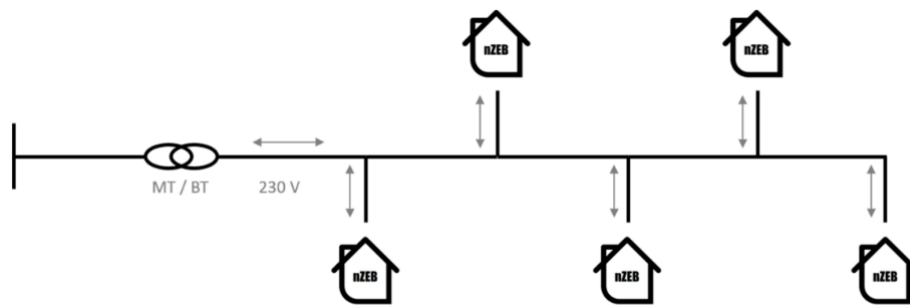


Figura 1. 7 - Integração de edifícios nZEB na RDBT

1.2 – Objetivos

Com o intuito de determinar os impactos da introdução de edifícios nZEB na RDBT, a presente dissertação tem como objetivo o desenvolvimento de uma ferramenta automática que faz o estudo diário de qualquer rede de distribuição de energia elétrica, para um dia típico do mês escolhido pelo utilizador. A ferramenta desenvolvida, com o nome nZEBt (nZEB tool), permite ao utilizador introduzir uma RDBT e os perfis diários de carga dos edifícios em cada nó da rede. Através da nZEBt é ainda possível converter um edifício convencional num edifício nZEB, através da integração de sistemas de geração fotovoltaica que permitem obter um balanço anual energético nulo entre o consumo e a produção de energia. Desta forma, é possível fazer o estudo diário do comportamento de uma RDBT em função do número de edifícios convertidos em nZEB, apresentando como resultados os impactos que advêm da integração destes edifícios. A nZEBt permite, ainda, a criação de diversos projetos, o que possibilita definir diferentes RDBT ou diferentes cenários para a mesma rede. Estes projetos, bem como os resultados provenientes do estudo, podem ser guardados e acedidos posteriormente.

1.3 – Estrutura do documento

A dissertação compreende cinco capítulos, organizados em diversas secções. As figuras, tabelas e equações apresentadas ao longo dos capítulos estão numeradas como “x.y”, sendo que x representa o número do capítulo e y a respetiva ordem numérica. Além deste capítulo introdutório, o presente documento contém os seguintes capítulos:

- Capítulo 2 – Apresenta estudos anteriores que quantificam problemas resultantes da introdução de GD e edifícios nZEB em redes de distribuição elétrica. De seguida são apresentadas ferramentas já existentes de análise de sistemas de potência. No final do capítulo é feita a comparação entre estas ferramentas e a nZEBt.
- Capítulo 3 – Descreve a solução proposta, apresentando o seu modelo funcional e arquitetural. De seguida, é especificada a tecnologia utilizada para o desenvolvimento da nZEBt e é feita a descrição pormenorizada de cada um dos módulos constituintes do modelo arquitetural. Neste capítulo são utilizados alguns termos na língua Inglesa, visto que a nZEBt foi desenvolvida na referida língua.
- Capítulo 4 – De modo a testar a ferramenta desenvolvida, neste capítulo são apresentados os cenários e a RDBT a considerar para o caso de estudo. São também expostos os resultados obtidos e é feita uma análise dos mesmos.
- Capítulo 5 – Neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido, bem como a sua contribuição, e é feita a sugestão de possíveis trabalhos futuros deixados em aberto.

Estado da Arte

Neste capítulo são apresentados estudos que quantificam os impactos provenientes da introdução de GD e de edifícios nZEB em redes de distribuição de energia elétrica. De seguida, são apresentadas ferramentas de análise de sistemas de potência já existentes no mercado e é feita a comparação entre a nZEBt e estas ferramentas. Por fim, é feita uma reflexão sobre as mais-valias resultantes do desenvolvimento da solução proposta.

2.1 – Integração de edifícios nZEB na rede de distribuição

As redes de distribuição de energia elétrica foram inicialmente concebidas presumindo um fluxo de energia unidirecional, do transformador de distribuição até à carga, estando as grandes centrais (e.g. térmicas ou hídricas) encarregues da geração de energia. Com a integração de GD nas redes de distribuição BT, o cenário altera-se e a produção de energia passa a situar-se junto ou nas proximidades do consumidor final. A introdução de edifícios nZEB contribui para o aumento de GD na RDBT, sendo que estes edifícios podem estar ligados à rede de distribuição elétrica.

A introdução de GD na RDBT poderá causar impactos na mesma [21]. Em alguns casos, estes impactos são positivos, existindo assim uma melhoria do comportamento da rede. Noutros casos, a introdução de GD leva a efeitos negativos na rede de distribuição, resultando em consequências nefastas para a rede e para os seus elementos.

2.1.1 – Desempenho da rede de distribuição de energia elétrica

Uma diminuição do desempenho da rede de distribuição de energia elétrica devido à introdução de GD não é diretamente um problema, desde que este se mantenha dentro de limites considerados como aceitáveis. Isto é, para cada indicador de performance de uma determinada rede existe um valor limite de GD, denominado *hosting capacity*², que não deve ser excedido para que o bom funcionamento da rede em questão seja garantido [22].

Através da Figura 2.1 a) verifica-se que um indicador de performance ilustrativo diminui com o aumento da quantidade de GD ligada à rede. Para pequenas quantidades de GD o indicador de performance, embora diminua, mantém-se dentro de valores aceitáveis, no entanto, para maiores quantidades de GD, este valor torna-se inaceitável. Um outro tipo de indicador de performance é apresentado na Figura 2.1 b). Existem casos em que a introdução de GD resulta, inicialmente, num aumento do indicador de performance da rede de distribuição. Contudo, com um aumento da quantidade de GD ligada à rede, este indicador irá diminuir. Desta forma, é possível distinguir dois limites de *hosting capacity*. O primeiro limite corresponde ao valor em que, depois da melhoria, o indicador de performance retorna ao valor inicial, onde não existia GD na rede de distribuição (HC1). O segundo limite corresponde ao limite a partir do qual o indicador de performance se torna inaceitável (HC2). Para ambos os indicadores de performance, a letra “A” corresponde ao valor inicial do indicador de performance quando não existe GD ligada à rede e a letra “B” corresponde ao valor de mínimo aceitável de indicador de performance.

Nas secções seguintes são apresentados exemplos de indicadores de performance, referentes a perdas energéticas, sobrecarga e perfil de tensão.

² O *hosting capacity* é um indicador que descreve a variação do desempenho da rede em função da quantidade de GD introduzida na referida rede.

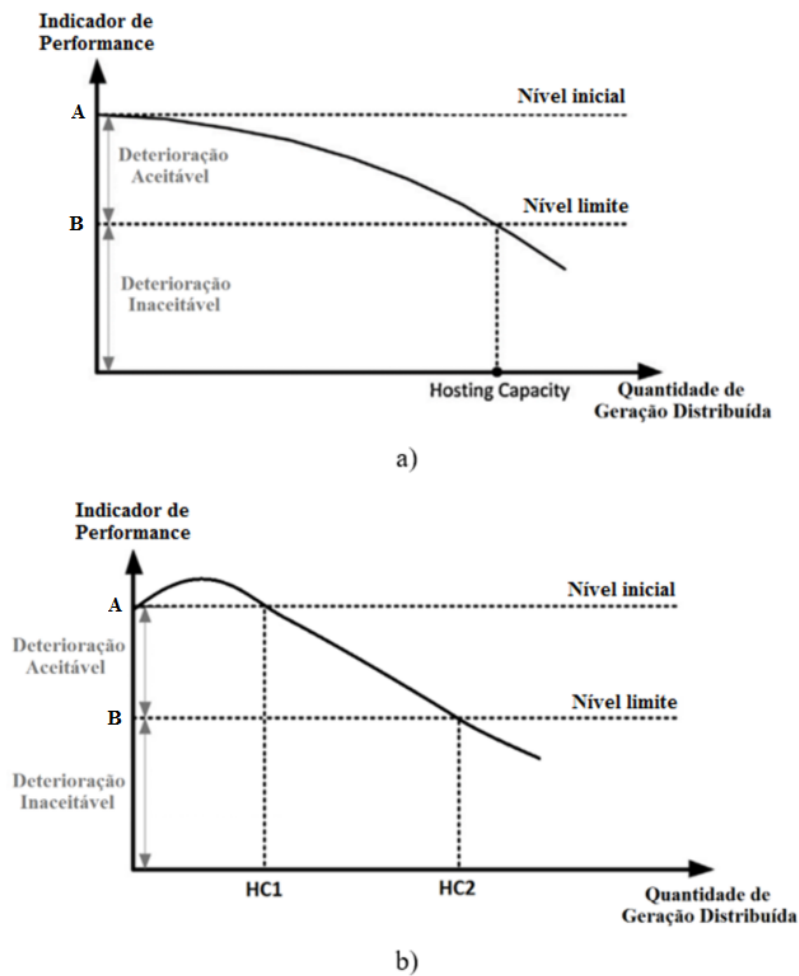


Figura 2. 1 - Variação do desempenho da rede em função da quantidade de GD introduzida. Adaptado de [22]

2.1.2 – Perdas energéticas

Comparativamente aos geradores convencionais das grandes centrais, a GD está conectada à rede com uma maior proximidade do consumidor, sendo a energia transportada através de uma distância mais curta. A integração de GD numa rede de distribuição elétrica pode causar uma redução significativa das perdas energéticas, melhorando assim o desempenho do sistema [22].

Uma redução das perdas é obtida quando a geração está localizada no mesmo local que o consumo, como acontece com os edifícios nZEB. O impacto da GD nas perdas de potência ativa foi quantificado por M. Thomson *et al.* [23], que calculou as perdas para uma RDBT no centro de Leicester, em Inglaterra, sem GD e depois quando 30% e 50% das casas foram equipadas com painéis solares fotovoltaicos nos seus telhados. Os resultados podem ser vistos na Tabela 2.1.

Tabela 2. 1. Impacto da energia solar fotovoltaica nas perdas de potência ativa numa RDBT [23]

Geração Distribuída	Perdas no Inverno	Perdas no Verão
0%	67 kW	34 kW
30%	60 kW	29 kW
50%	58 kW	27 kW

De acordo com D.G. Infield et al. [24], ao combinar a energia solar fotovoltaica com co-geração (CHP) na mesma RDBT, é possível reduzir as perdas até 50%, como apresentado na Tabela 2.2. Tal acontece porque com 100% das casas equipadas com sistemas de CHP e 50% com sistemas fotovoltaicos, é possível obter perfis de geração não coincidentes das duas tecnologias, aproveitando os períodos em que existe disponibilidade do recurso solar para gerar energia através dos sistemas fotovoltaicos e utilizando sistemas de CHP nos restantes períodos do dia. Deste modo, dá-se uma diminuição do fluxo de energia a transitar na rede, visto que a geração se situa no local ou nas proximidades do edifício.

Tabela 2. 2. Perdas numa RDBT combinando CHP e energia solar fotovoltaica [24]

Geração Distribuída	Perdas no Inverno	Perdas no Verão
Nenhuma	67 kW	34 kW
100% co-geração	36 kW	28 kW
50% solar	58 kW	27 kW
100% co-geração e 50% solar	33 kW	24 kW

No entanto, com uma maior incidência de GD, é possível que o trânsito de energia passe a transitar no sentido inverso, ou seja, no sentido da carga para a rede. Desta forma, as perdas poderão ser maiores do que seriam inicialmente sem GD. Num estudo efetuado por F.A. Viawan *et al.* [25], para uma determinada RDBT de 230V, as perdas tornam-se maiores que as iniciais quando mais de 110 kW de GD é ligada à rede de distribuição. Os resultados deste estudo, referentes às perdas, são apresentados na Figura 2.2, onde P_{GD} corresponde à quantidade de GD ligada à rede.

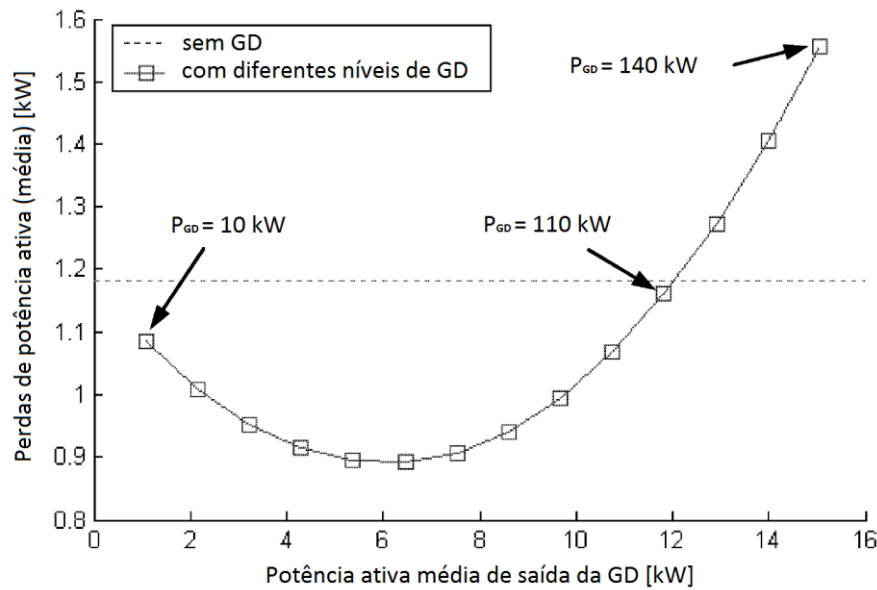


Figura 2. 2 – Valor médio de perdas de potência ativa por potência ativa média de saída da GD. Adaptado de [25]

Um estudo efetuado por Rui Lopes *et al.* [11] apresenta as perdas totais anuais por efeito de Joule numa RDBT de 33 barramentos, em função do número de edifícios convertidos para nZEB. Estes dados são apresentados na Figura 2.3 e, através da mesma, verifica-se que, à medida que o número de edifícios nZEB aumenta, as perdas diminuem, devido ao reduzido trânsito de energia ao longo da rede, atingindo o seu valor mínimo quando 10 edifícios são do tipo nZEB. Depois de atingido este valor mínimo, as perdas aumentam quando mais edifícios são convertidos em nZEB, atingindo um valor máximo de perdas 65,4% superior ao valor inicial quando 33 edifícios são do tipo nZEB. Quando todos os edifícios são convertidos em nZEB, é durante a tarde que se verificam os valores mais elevados de perdas de energia. Este fenómeno ocorre, essencialmente, porque é neste período que se registam maiores valores de irradiância solar e, consequentemente, a produção excede o consumo, passando os edifícios a alimentar a rede elétrica [11].

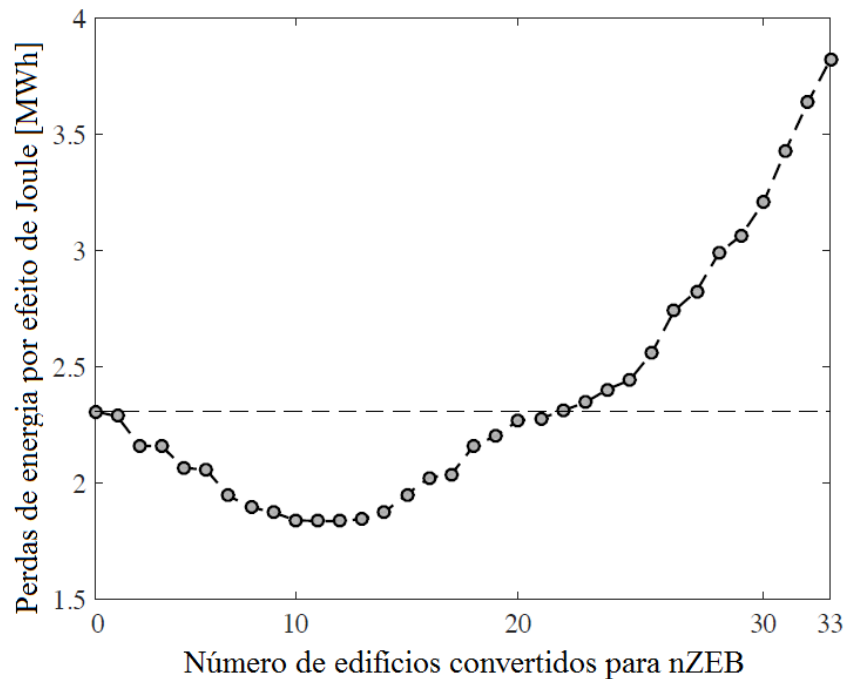


Figura 2. 3 - Perdas anuais de energia por efeito de Joule em função do nº de edifícios convertidos para nZEB. Adaptado de [11]

Todavia, segundo Bollen *et al.* [22] não existe qualquer necessidade de considerar o aumento das perdas, devido à GD, como um fator limitante à mesma. Embora a GD afete as perdas, a importância desta está no uso de fontes de energia renovável, sendo que qualquer impacto nas perdas será apenas uma pequena percentagem na quantidade de energia injetada na rede de forma sustentável.

2.1.3 – Sobrecarga

O impacto da GD no risco de sobrecarga é mais direto e o limite para a quantidade de GD que pode ser conectada à rede poderá ser mais exigente. A introdução de GD pode originar um aumento do pico de potência na RDBT. Um valor de pico de potência subestimado pode levar à sobrecarga de componentes da rede, como os troços e os dispositivos de proteção, e a uma redução na qualidade do serviço. Deste modo, contrariamente às perdas energéticas, o risco de sobrecarga é considerado como um fator limitante à conexão de GD em redes de distribuição [22].

Pequenas quantidades de GD irão reduzir a amplitude do fluxo de energia a transitar numa linha de distribuição e, consequentemente, o valor do pico de potência. Contudo, ao introduzir maiores quantidades de GD na RDBT, o trânsito de energia no sentido inverso torna-se predominante nas alturas do dia em que a geração excede o consumo.

A introdução de sistemas fotovoltaicos em edifícios leva a alterações nos diagramas da carga diários dos mesmos e, consequentemente, no perfil de carga anual médio da rede de distribuição em que estes estão inseridos. Este efeito é estudado em [11] e está apresentado na Figura 2.4, que demonstra o perfil de carga anual médio da RDBT, no nó do transformador, quando 0, 9, 17, 25 e 33 edifícios são convertidos para nZEB. Devido à disponibilidade restrita da energia solar, o perfil de carga é apenas afetado durante o dia, visto que durante os períodos noturnos não há produção de energia por parte dos edifícios. Através da figura verifica-se que, com o aumento de edifícios do tipo nZEB, o trânsito de energia transita no sentido inverso e o transformador de distribuição MT/BT é forçado a trabalhar como transformador de elevação de tensão, recebendo energia da rede de distribuição BT.

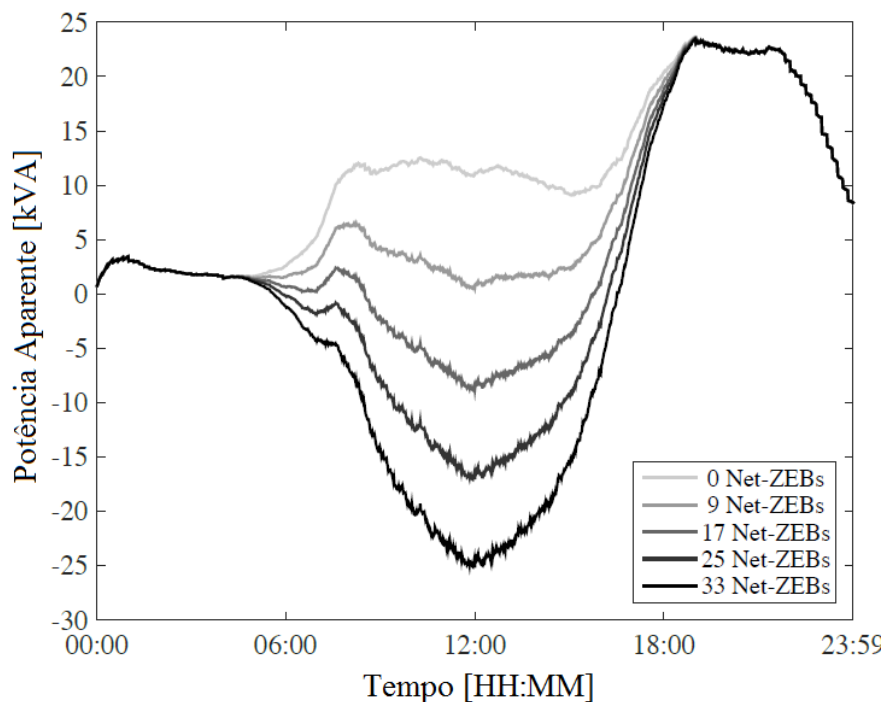


Figura 2. 4 - Perfil médio diário de carga anual na saída do transformador de uma RDBT em função do nº de edifícios convertidos para nZEB. Adaptado de [11]

Os impactos no perfil de carga das redes de distribuição BT resultam também na alteração do valor do pico de potência das mesmas, sendo que este é um parâmetro importante para projetar os componentes da rede, tais como os dispositivos de proteção. A Figura 2.5 mostra o valor médio do pico de potência diário na saída do transformador de distribuição para diferentes níveis de integração de edifícios nZEB, onde se verifica que inicialmente existe uma diminuição no valor do pico de potência, no entanto, com

maior incidência de edifícios nZEB, este valor aumenta, atingindo um valor 4,0% superior ao inicial quando todos os edifícios são convertidos em edifícios nZEB.

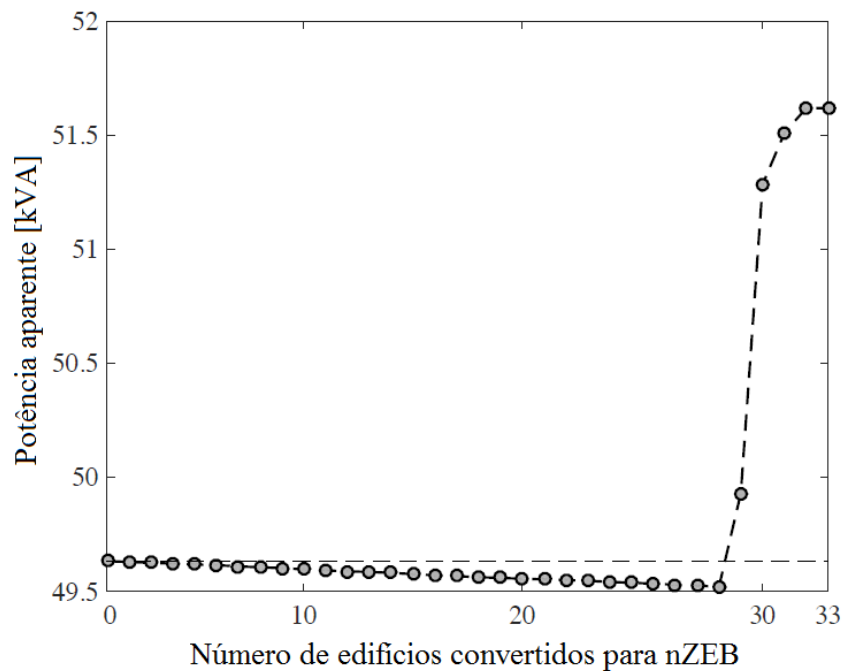


Figura 2. 5 - Valor médio do pico de potência diário em função do nº de edifícios convertidos para nZEB. Adaptado de [11]

2.1.4 – Perfil de tensão

A integração de GD em redes de distribuição elétricas que apresentem dificuldades com valores baixos de tensão pode proporcionar o suporte necessário para que estas possam aumentar o seu nível de tensão, especialmente no caso das redes radiais [26].

Nas redes de distribuição BT, sem GD e com topologia radial, a energia transita de maiores para menores níveis de tensão, isto é, do transformador de distribuição para os consumidores. Porém, com a introdução de GD, este paradigma tem vindo a ser alterado, resultando em aumentos de tensão ao longo da rede. Quando se consideram sistemas fotovoltaicos como unidades de GD, estes impactos variam fortemente ao longo do dia, seguindo a disponibilidade da fonte de energia solar.

As excessivas quedas de tensão numa RDBT são de extrema importância e, para tal, são estabelecidos limites para o comprimento máximo da linha de distribuição, bem como para valores mínimos aceitáveis de tensão. As sobretensões têm sido, tradicionalmente, de menor importância. Contudo, com a introdução de GD nas redes de

distribuição BT, as sobretensões tornaram-se num problema mais sério, especialmente para nós distantes do transformador de distribuição MT/BT [22].

O perfil de tensão diário de uma residência é apresentado na Figura 2.6, considerando dois cenários: o cenário base, em que nenhuma das casas presentes na RDBT contém sistemas de geração fotovoltaica e o cenário em que foram instalados sistemas fotovoltaicos em 50% das residências [23].

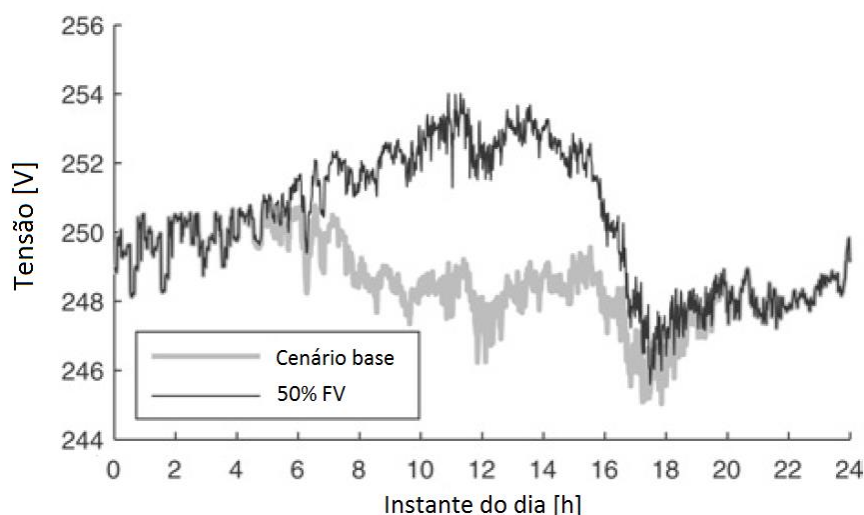


Figura 2. 6 – Perfil de tensão numa residência antes e depois de 50% das casas presentes na mesma RDBT terem sido equipadas com sistemas fotovoltaicos. Adaptado de [23]

A Figura 2.7 mostra a amplitude da tensão (entre linhas) em cada nó da RDBT, em dois instantes de tempo distintos, quando 33 edifícios são convertidos para nZEB [11]. As linhas a cinzento representam os limites mínimos e máximos de tensão. Através da figura verifica-se que às 20h00, o valor de tensão diminui ao longo da rede, visto que a esta hora os sistemas fotovoltaicos não têm qualquer influência na rede. Contudo, às 12h00, quando a fonte primária de energia (solar) está disponível e todos os edifícios nZEB estão a produzir energia, o perfil de tensão é fortemente afetado e verifica-se um efeito crescente do valor de tensão ao longo da rede. Desta forma, os edifícios localizados no fim da rede de distribuição vão sofrer um maior aumento no nível de tensão. Os valores de tensão encontram-se truncados, não excedendo o limite máximo admitido, visto que se recorreu ao *curtailment*³ de energia, de modo a manter os níveis de tensão dentro dos limites regulatórios.

³ A expressão *curtailment* traduz uma interrupção na geração de energia de modo a repor os normais níveis de desempenho da rede.

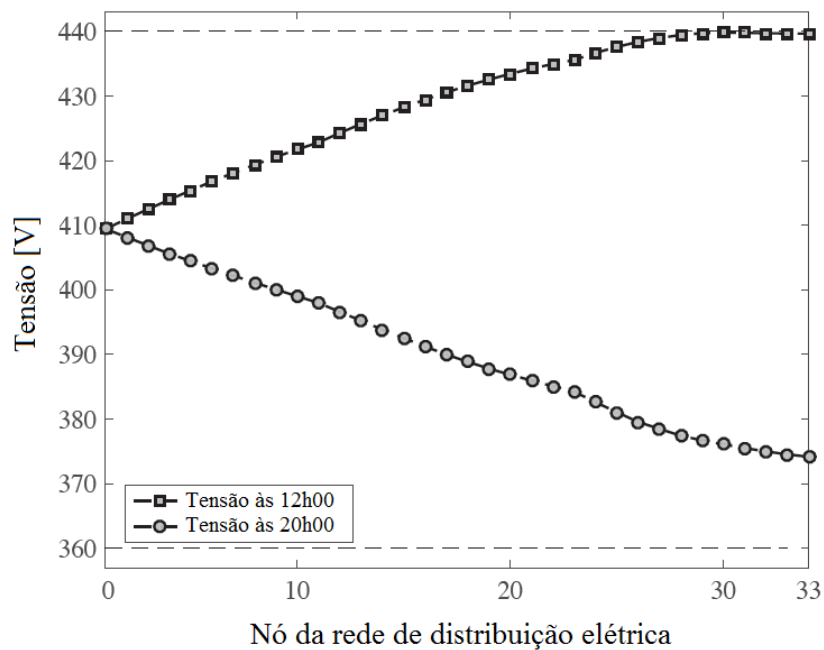


Figura 2. 7 - Tensão em cada nó em dois instantes de tempo diferentes, quando são convertidos 33 edifícios para nZEB. Adaptado de [11]

Na secção 2.2 são apresentadas ferramentas que permitem efetuar a análise de redes de transmissão e distribuição elétrica, bem como obter os indicadores de desempenho descritos na presente secção.

2.2 – Ferramentas de análise de sistemas de potência já existentes

O setor da energia elétrica enfrenta uma das mais rápidas mudanças e apresenta enormes necessidades no que diz respeito à procura de energia. As empresas do setor estão divididas em entidades distintas, que tratam da produção, transmissão, distribuição e comercialização de energia [27]. A principal necessidade de uma empresa de transmissão ou distribuição de energia prende-se com a satisfação dos clientes, o que requer um planeamento eficiente das suas redes, quer a curto ou longo prazo, garantindo, desta forma, a qualidade do serviço [28]. Uma condição instável pode causar os sistemas de proteção das redes a isolar as áreas afetadas, o que pode causar instabilidade noutras zonas da rede (e.g. devido a eventuais sobrecargas) que pode culminar, eventualmente, numa interrupção total no serviço de energia, vulgarmente conhecido como *blackout* do sistema. O avanço da tecnologia computacional permitiu o desenvolvimento de ferramentas poderosas de análise de sistemas de potência, sendo que estas têm um papel

de extrema importância na análise, planeamento e operação dos sistemas de energia [29]. Estas ferramentas modelam o comportamento de redes elétricas (da Baixa à Muito Alta-Tensão), fazendo uso de modelos matemáticos, e fornecem ao utilizador interfaces especificamente desenvolvidas para efetuar a análise das referidas redes.

Embora as ferramentas de simulação existentes utilizem modelos matemáticos semelhantes, cada um destes propõe uma abordagem diferente e apresenta funcionalidades específicas. Segundo Stephanie Hay *et al.* [30], as ferramentas de análise de sistemas de potência são, sobretudo, utilizadas para estudos de trânsito de potência, análise de contingências, estabilidade no transitório e harmónicas, sendo que, entre as ferramentas existentes no mercado, existem ferramentas que são amplamente utilizadas a nível global, como é o caso da Siemens PSS/E, IPSA, DIgSILENT PowerFactory e ETAP:

- Siemens PSS/E (Power System Simulator for Engineering) ⁴

É uma ferramenta integrada, interativa, que permite simular, analisar e otimizar a performance de um sistema de potência. Através do PSS/E é possível fazer a análise de diversas redes num horizonte de planeamento a longo prazo. Apresenta funcionalidades que possibilitam ao utilizador obter o trânsito de energia, fazer a análise de contingências e obter indicadores de performance da rede, como o valor das perdas por efeito de Joule ou de sobrecarga em determinados troços.

- IPSA (Interactive Power System Analysis) ⁵

Apresenta uma interface de fácil utilização para o utilizador e permite obter o trânsito de energia ótimo, ou *optimal power flow*, a estabilidade do transitório e uma análise de confiabilidade da rede. É utilizado para analisar, planificar, otimizar e gerir redes elétricas para qualquer nível de tensão e número ilimitado de barramentos;

⁴ <https://www.siemens.com/global/en/home/products/energy/services/transmission-distribution-smart-grid/consulting-and-planning/pss-software/pss-e.html>

⁵ <https://www.ipsa-power.com/>

- DIgSILENT PowerFactory ⁶

É um software integrado que combina flexibilidade e confiabilidade nos algoritmos utilizados para a modelação de dados. Inclui uma versátil base de dados orientada a objetos e permite desenvolver modelos com uma vasta gama de características em regime permanente, domínio da frequência e domínio do tempo. Entre algumas das funcionalidades existentes estão a análise de confiabilidade da rede, o planeamento da produção de energia, análise de contingências e modelação de dispositivos de eletrónica de potência;

- ETAP (Electrical Power System Analysis & Operation Software) ⁷

O software contém vários módulos como o de análise dos sistemas de potência, simulação em tempo real, monitorização avançada, deslastre inteligente de cargas, análise do custo de energia e coordenação de dispositivos. É uma ferramenta integrada que permite o projeto, simulação e análise de sistemas de geração, transmissão e distribuição de energia. Permite o projeto, manutenção e operação de um sistema de potência num ambiente totalmente gráfico.

Existem ainda outras soluções menos utilizadas, mas com alguma relevância no mercado como [31]:

- ASPEN (Advanced Systems for Power Engineering) ⁸;
- CYME ⁹;
- Electrocon CAPE (Computer-Aided Protection Engineering) ¹⁰;
- EMTP (Electromagnetic Transients Program) ¹¹;
- Eurostag ¹²;
- Neplan ¹³;
- Power Analytics Paladin DesignBase ¹⁴;

⁶ <https://www.digsilent.de/en/powerfactory.html>

⁷ <https://etap.com/>

⁸ <https://www.aspeninc.com/web/>

⁹ <https://www.cyme.com/software/>

¹⁰ <https://www.electrocon.com/>

¹¹ <https://emtp-software.com/>

¹² <https://www.eurostag.be/>

¹³ <https://www.neplan.ch/>

¹⁴ <https://www.poweranalytics.com/>

- PowerWorld ¹⁵;
- SimPow ¹⁶;

A escolha de um software em detrimento de outro deve depender das necessidades do utilizador. Para um estudo sobre a estabilidade de um sistema, pode ser recomendado o Eurostag, no entanto este já não se revela eficiente para simular diversos trânsitos de potência para horizontes de planeamento a longo prazo. Para o planeamento de redes, o Neplan e o DIgSILENT PowerFactory apresentam uma maior flexibilidade e facilidade de utilização, mesmo se o utilizador necessitar de fazer simulações de estabilidade. O Neplan é bastante intuitivo no cálculo de curto-circuitos e nas simulações de estabilidade de tensão [31].

2.3 – Discussão

Tal como as ferramentas descritas, a nZEBt permite obter o trânsito de potência de uma rede de distribuição, calcular as perdas energéticas, situações de sobrecarga, pico de potência no transformador e perfil de tensão da referida rede. No entanto, contrariamente às ferramentas existentes no mercado, a nZEBt permite fazer o estudo de uma RDBT ao longo dos vários instantes de um dia típico de qualquer mês escolhido pelo utilizador. Através da ferramenta desenvolvida, é possível gerar automaticamente um diagrama de carga diário de uma residência, considerando o seu número de ocupantes. A resolução temporal dos perfis diários de carga obtidos é escolhida pelo utilizador, sendo que a ferramenta permite diferentes taxas de amostragem. A nZEBt permite, ainda, converter um edifício convencional num edifício nZEB, através da introdução de geração fotovoltaica no mesmo.

Desta forma, com a nZEBt é possível efetuar um estudo de uma rede de distribuição elétrica e, assim, determinar os impactos da introdução de edifícios nZEB na referida rede. Com a ferramenta desenvolvida é possível criar vários cenários para a mesma rede, considerando, por exemplo, um cenário inicial em que não existe nenhum edifício nZEB e, de seguida, diversos cenários com uma diferente incidência de edifícios deste tipo. Os resultados obtidos são gerados automaticamente e guardados no computador do utilizador para posterior análise.

¹⁵ <https://www.powerworld.com/>

¹⁶ <https://www.simpow.com/>

Embora as ferramentas presentes no mercado tenham feito muitos progressos e a sua utilização seja impreterível na análise, planeamento, monitorização e gestão dos sistemas de potência, existem ainda muitos pontos a melhorar. A capacidade de importar e exportar dados é uma importante funcionalidade numa ferramenta de análise de sistemas de potência, bem como a portabilidade dos mesmos. A ferramenta DIgSILENT PowerFactory é compatível com a ferramenta PSS/E, sendo que, desta forma, é possível a portabilidade de dados entre as ferramentas referidas [28]. A nZEBt, para gerar os diagramas de carga diários e os perfis de geração fotovoltaica de um edifício, acede a entidades externas (posteriormente especificadas no Capítulo 3). O formato dos dados provenientes de cada uma destas entidades é diferente, no entanto, devido aos algoritmos de tratamento de dados da nZEBt, estes apresentam um formato único e padronizado, possibilitando, assim, a integração entre estas entidades externas e a nZEBt.

Cada vez existem mais ferramentas de análise de sistemas de potências, sendo que as estruturas destas ferramentas são extremamente complicadas [32]. Adicionalmente, as interfaces gráficas são complexas, quando deveriam ser simples e de fácil utilização, sendo esta uma das funcionalidades mais importantes de uma ferramenta de análise de sistemas de potência [28]. Por conseguinte, a nZEBt tem uma estrutura pouco complexa, que garante o cumprimento dos objetivos a que se propôs e apresenta uma interface gráfica simples e de fácil utilização por parte do utilizador, contendo apenas elementos estritamente necessários para o cumprimento dos objetivos à qual se propôs.

Com o surgimento de novas tecnologias e conceitos (como o nZEB), é necessário que exista uma adaptação das ferramentas de análise de sistemas de potência já existentes, o que origina uma variedade de desafios técnicos e comerciais, tais como a atualização ou desenvolvimento de novos modelos, bem como o custo associado a estas soluções. Existem alguns exemplos de ferramentas que estão a trabalhar na melhoria dos seus modelos, como é o caso da DIgSILENT PowerFactory, que numa nova versão incluiu a otimização do perfil de tensão para trânsitos de potência bi-direcionais [30]. A ferramenta nZEBt foi desenvolvida considerando a integração de edifícios nZEB na RDBT, permitindo até a sua conversão (de edifício convencional para edifício nZEB) através da ferramenta, o que se revela uma mais-valia para um utilizador que queira estudar o impacto deste tipo de edifícios numa rede de distribuição elétrica.

Segundo Lokendra Bam *et al.* [28], uma funcionalidade muito importante nas ferramentas de análise de sistemas de potência é a capacidade de estas permitirem uma representação gráfica das redes de distribuição elétrica, com facilidades na criação e edição das mesmas. A maioria das ferramentas existentes contém esta funcionalidade, ainda que existam ferramentas que necessitem de alguma melhoria neste campo. A Figura 2.8 apresenta a representação gráfica de uma rede, elaborada na ferramenta PSS/E.

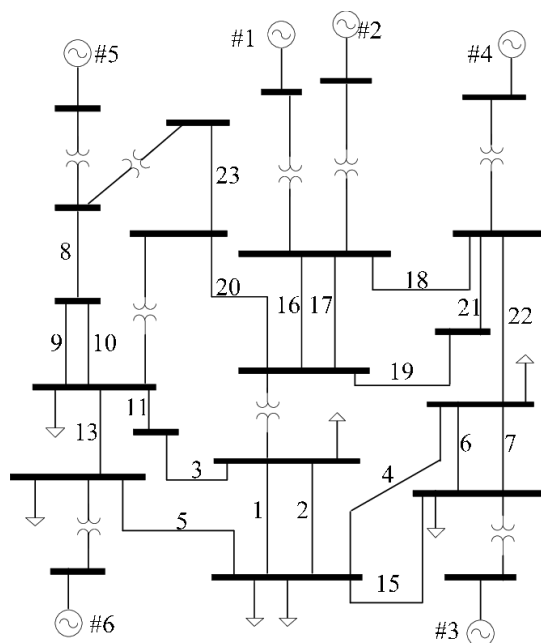


Figura 2. 8 – Representação gráfica de uma rede de distribuição elétrica. Ferramenta: PSS/E [33]

Uma das principais barreiras à utilização destas ferramentas é o custo das mesmas, sendo que o preço médio de uma licença, para as ferramentas apresentadas acima como as mais utilizadas, ronda os dez mil dólares. Para além de serem particularmente caras, estas ferramentas são complexas, sendo que para dominar uma ferramenta nova é necessário despendar algum tempo, e muitos utilizadores não têm essa disponibilidade (em tempo e dinheiro) para determinar qual a ferramenta mais adequada para a aplicação que pretende [29]. Existem algumas ferramentas que têm versões gratuitas para educação, como é o caso da ferramenta PSS/E da Siemens. Embora a nZEBt não seja concorrente destas ferramentas, apresenta-se como uma ferramenta gratuita que permite o acesso livre a todos os utilizadores.

A Tabela 2.3 apresenta a comparação entre algumas funcionalidades das ferramentas de análise de sistemas de potência mais utilizadas e da nZEBt.

Tabela 2. 3 - Comparação entre ferramentas existentes no mercado e a ferramenta nZEBt

	Siemens PSS/E	DigSilent PowerFactory	ETAP	nZEBt
Trânsito de potência	✓	✓	✓	✓
Perdas energéticas	✓	✓	✓	✓
Sobrecarga	✓	✓	✓	✓
Perfil de tensão	✓	✓	✓	✓
Cálculo de curtos-circuitos	✓	✓	✓	✗
Análise de transitórios	✓	✓	✓	✗
Representação gráfica da rede	✓	✓	✓	✗
Análise diária da rede para um mês específico	✗	✗	✗	✓
Geração automática de diagrama de carga diário	✗	✗	✗	✓
Conversão para edifício nZEB	✗	✗	✗	✓
Simplicidade da interface gráfica	✗	✗	✗	✓
Ferramenta gratuita	✗	✗	✗	✓

Solução Proposta

No presente capítulo é apresentada a solução proposta cujo objetivo é auxiliar na quantificação dos impactos descritos nos capítulos anteriores. A ferramenta nZEBt foi, desta forma, desenvolvida para garantir o cumprimento de todos os objetivos propostos e assenta numa arquitetura composta por vários blocos, em que os módulos constituintes dos mesmos interagem entre si.

Na Secção 3.1 descreve-se o Modelo Funcional da nZEBt. Nesta secção são referidos os dados, entidades, métodos e módulos que suportam a ferramenta, sendo estes, posteriormente, aprofundados na secção de implementação da ferramenta. Na Secção 3.2 apresenta-se o Modelo Arquitetural, onde é descrita a arquitetura da ferramenta. Seguidamente, a secção 3.3 foca a implementação da ferramenta, onde é especificada a tecnologia utilizada para o desenvolvimento da nZEBt e apresentado o modelo arquitetural em detalhe, com a descrição pormenorizada de cada um dos módulos constituintes.

3.1 – Modelo Funcional

O modelo funcional apresenta e descreve todas as funcionalidades colocadas ao dispor do utilizador. A ferramenta desenvolvida oferece ao utilizador a possibilidade de inserir os dados de uma qualquer RDBT e assim auxiliar na determinação dos impactos da introdução de edifícios nZEB na referida rede. A Figura 3.1 apresenta o respetivo Diagrama de Casos de Uso (DCU).

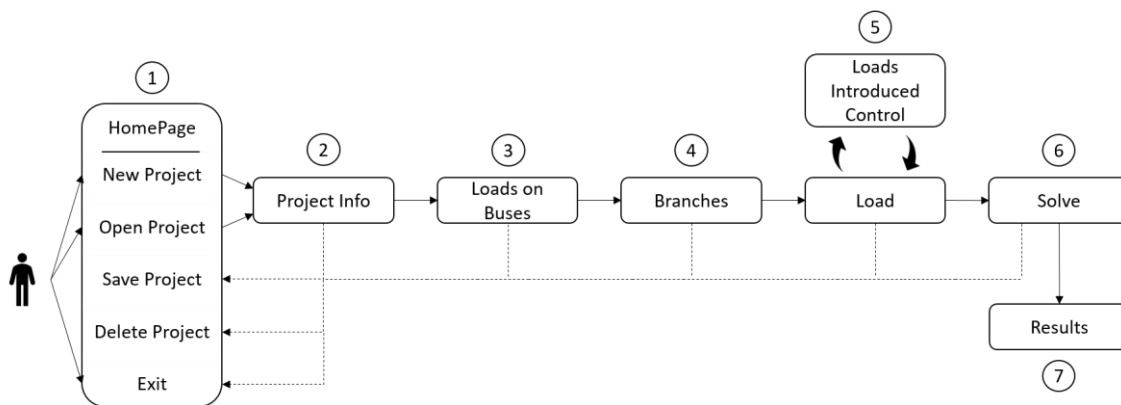


Figura 3. 1 – Diagrama de casos de uso

Para fazer o estudo de uma rede de distribuição, a ferramenta compreende sete fases. Estas fases permitem ao utilizador criar ou abrir um projeto, introduzir toda a informação referente a determinada rede e obter o trânsito de energia da referida rede, bem como os resultados relacionados com indicadores de desempenho da rede. Estes indicadores serão apresentados mais à frente. Uma breve descrição de cada uma das fases é apresentada de seguida.

3.1.1 – Página inicial

Numa primeira instância, o utilizador tem duas opções para iniciar o estudo de uma RDBT, nomeadamente, a criação de um novo projeto, ou a abertura de um projeto já existente. Estas opções estão representadas no DCU como “New Project” ou “Open Project”, respetivamente. Para sair da ferramenta o utilizador tem ao seu dispor a opção “Exit” que pode ser acedida em qualquer parte do programa, sendo que nas etapas posteriores à presente é perguntado ao utilizador se pretende gravar o projeto antes de sair.

Em ambas as opções de criação e de abertura de um projeto é apresentada uma janela que solicita ao utilizador o nome do projeto a criar ou abrir. Existe um controlo para a criação de novos projetos, com o propósito de evitar redundância, que verifica se já existe algum nome igual ao inserido. Se sim, é mostrado um aviso de erro ao utilizador, caso contrário o projeto é criado. Para a abertura, o processo é semelhante. Na Figura 3.2 são apresentados os controlos referidos.

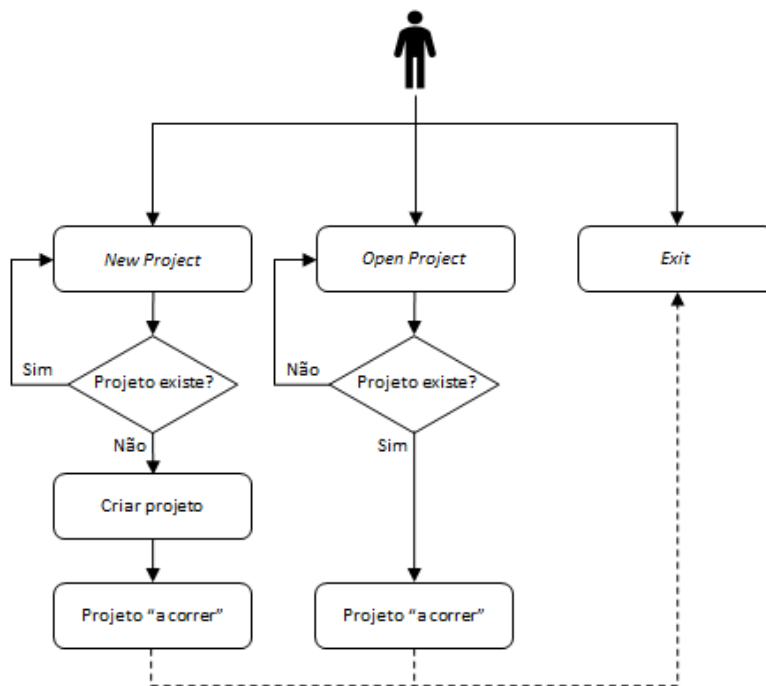


Figura 3. 2 – Controlo para a criação e abertura de projetos

3.1.2 – Informação base do projeto

Uma vez com um projeto aberto, o utilizador pode agora passar à introdução dos dados da RDBT. Relativamente à rede, os dados a introduzir são:

- Número de barramentos;
- Número de cargas;
- Tensão nominal no barramento de referência (saída do transformador);
- Potência nominal do transformador MT/BT;
- Localização da rede de distribuição;
- Mês para o qual a simulação será feita.

Visto que a nZEBt efetua o estudo da rede ao longo de um dia é também necessário que o utilizador introduza a resolução temporal a considerar, sendo que a ferramenta suporta taxas de amostragem de 1 e 15 minutos. Estando estes dados introduzidos, a ferramenta tem a informação base da rede de distribuição. O utilizador pode passar para a próxima fase.

3.1.3 – Cargas nos barramentos

Numa RDBT podem existir barramentos que não têm qualquer carga. Desta forma, é necessário definir inicialmente quais os barramentos que terão uma carga associada. Para tal, foi implementado um algoritmo que, com base no número de barramentos introduzidos pelo utilizador na fase anterior, gera automaticamente uma lista dos barramentos da rede. Nesta lista é possível escolher quais os barramentos que terão carga, facilitando desta forma a utilização da ferramenta por parte do utilizador.

3.1.4 – Linhas

Estando os parâmetros da RDBT introduzidos e os barramentos definidos é necessário, agora, fazer a ligação entre cada um deles, definindo a arquitetura da rede de distribuição. Assim sendo, nesta fase, o utilizador introduz as linhas da referida rede. Para cada linha, o utilizador especifica a sua impedância, indicando a resistência e a reactância, em Ohm (Ω).

3.1.5 – Cargas

Neste separador são introduzidas as cargas para cada um dos barramentos previamente definidos. Aqui, o utilizador introduz qual o barramento em que irá adicionar a carga, sendo que este barramento tem de já existir na rede especificada. O barramento tem, também, de estar definido como um barramento que contém uma carga, caso contrário a ferramenta apresenta uma mensagem de erro no ecrã.

Depois de escolher em qual dos barramentos introduz a carga, e estando este validado, é necessário adicionar o diagrama de carga diário do edifício, sendo que serão os edifícios as cargas da RDBT a considerar para o estudo. Para tal, o utilizador dispõe de dois métodos para a introdução de um diagrama de carga diário (Os dois métodos referidos serão explicados detalhadamente na secção 3.3.2.1 e 3.3.2.2.):

- 1) Introdução através de dados personalizados;
- 2) Geração automática através de entidade externa.

O fluxograma referente aos métodos para a introdução de um diagrama de carga diário é apresentado na Figura 3.3.

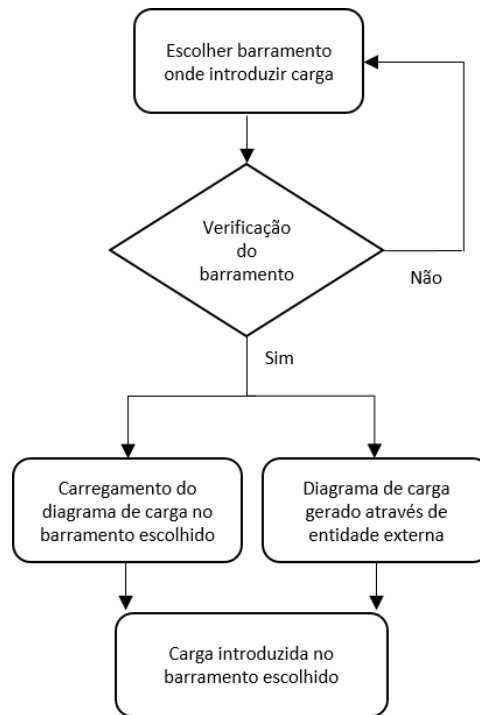


Figura 3. 3 – Introdução de um diagrama de carga num barramento escolhido

O utilizador tem ao seu dispor a possibilidade de tornar uma das cargas num edifício nZEB, através da introdução de geração fotovoltaica em qualquer edifício já inserido. Para tal introduz os parâmetros da instalação fotovoltaica, sendo estes:

- Potência de pico da instalação [kWp];
- Perdas totais da instalação [%];
- Rendimento do inversor DC/AC [%];
- Inclinação [°];
- Azimute [°].

Os parâmetros apresentados encontram-se pré-definidos, no entanto, é possível, para cada edifício, o utilizador determinar estes valores. Com base nestes parâmetros, a ferramenta acede a uma entidade externa, descrita em 3.3.2.2, e introduz geração fotovoltaica no nó previamente escolhido. Este processo é apresentado na Figura 3.4.

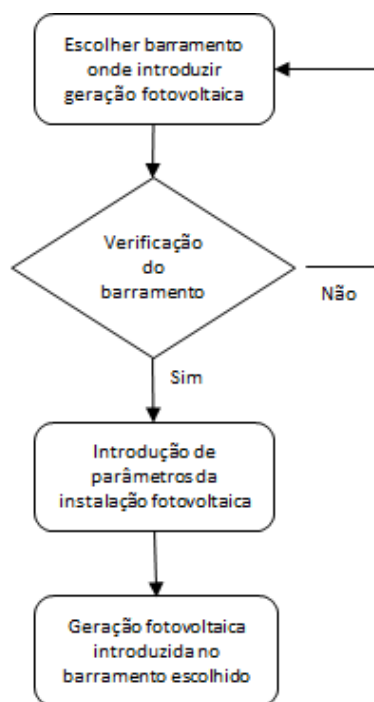


Figura 3. 4 – Introdução de geração fotovoltaica num barramento escolhido

3.1.6 – Execução

Após o utilizador ter introduzido toda a RDBT corretamente, neste separador é-lhe permitido obter o trânsito de energia da referida rede de distribuição. O método de cálculo é um processo iterativo que será repetido até ser atingida a tolerância de erro desejada, tendo, no entanto, em conta um número máximo de iterações. Os valores de número máximo de iterações e tolerância encontram-se pré-definidos, no entanto, podem ser alterados pelo utilizador. A informação que serve de entrada para o cálculo do trânsito de energia é a informação proveniente de todos os parâmetros da rede e respetivas cargas introduzidas na ferramenta até este ponto. O método de cálculo do trânsito de potência será descrito com detalhe em 3.3.2.7.

3.1.7 – Resultados

Uma vez obtido o trânsito de potência da RDBT, a nZEBt procede à computação dos dados inseridos, de modo a apresentar os resultados provenientes do estudo da referida rede. Os resultados obtidos são em termos de perfil de tensão, pico de potência no transformador e perdas energéticas. Estes resultados são apresentados através da interface gráfica da ferramenta e são também gerados em ficheiros de texto, de modo a poderem ser acedidos posteriormente.

3.2 – Modelo Arquitetural

A arquitetura da nZEBt é apresentada na Figura 3.5. É uma arquitetura assente em quatro macro blocos que interagem entre si: Dados, Interface, Computação e Entidade. Cada um destes blocos é constituído por um ou mais módulos.

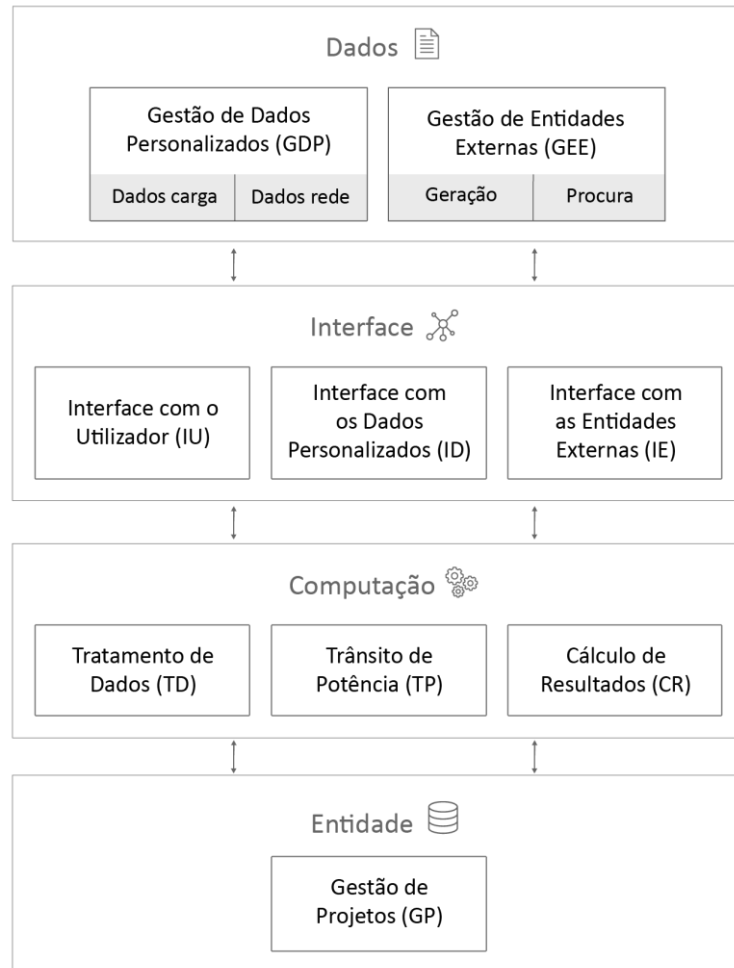


Figura 3. 5 – Arquitetura da nZEBt

De seguida são descritos cada um dos blocos constituintes da arquitetura apresentada, bem como cada um dos módulos neles presentes. A descrição detalhada da implementação dos módulos referidos é, posteriormente, apresentada na secção 3.3.2.

3.2.1 – Dados

O bloco de Dados representa toda a informação que servirá como entrada da ferramenta. Estes dados podem ser criados e personalizados pelo utilizador ou obtidos através de entidades externas.

No módulo de Gestão de Dados Personalizados (GDP) o utilizador pode criar os seus dados e introduzi-los na nZEBt. Estes dados podem ser personalizados de acordo com as necessidades do utilizador. Desta forma, o utilizador introduz os seus próprios dados referentes às cargas e à rede, seguindo formulários pré-definidos. Para os dados das cargas, é possível definir os diagramas de carga diários de cada um dos edifícios, sendo necessário introduzir os valores de potência ativa e reativa consumida. No que diz respeito aos dados da rede, a nZEBt suporta a introdução dos parâmetros das linhas e os valores a introduzir são, para cada uma das linhas, os valores de impedância complexa.

A nZEBt permite também a introdução de dados provenientes de entidades externas. Os algoritmos desenvolvidos acedem a estas entidades e obtêm os valores que servem de entrada da ferramenta. Para a procura, é possível gerar estes dados, obtendo assim um diagrama de carga diário, através de um modelo estocástico. Para a geração, é possível adicionar sistemas fotovoltaicos a um ou mais edifícios, possibilitando, assim, a sua conversão para nZEB. O modelo estocástico e a conversão de um edifício para nZEB serão detalhados na secção 3.3.2.

3.2.2 – Interface

O principal objetivo da Interface é estabelecer uma relação entre a nZEBt e tudo o que é exterior à mesma, assegurando uma boa comunicação com o utilizador, bem como com os dados personalizados e com as entidades externas. Através da Interface é, portanto, possível fornecer ao bloco Computação todos os dados necessários para efetuar o estudo de qualquer RDBT.

O módulo Interface com o Utilizador (IU) possibilita a comunicação entre a nZEBt e o utilizador, através de uma interface gráfica. Esta interface permite ao utilizador introduzir na ferramenta a informação referente à RDBT que se quer estudar. É também através da interface gráfica que são apresentados alguns dos resultados provenientes do estudo efetuado. Relativamente à interface com os dados personalizados, esta é assegurada através do módulo Interface com os Dados Personalizados (ID) e dota a ferramenta de algoritmos que acedem aos dados personalizados e integram esta informação na ferramenta. De modo a ser possível criar uma relação entre as entidades externas e a ferramenta, o módulo Interface com as Entidades Externas (IE) foi

implementado. Este módulo permite aceder a cada uma das entidades externas, proporcionando, assim, o acesso e integração de informação proveniente destas fontes.

3.2.3 – Computação

O bloco de Computação é responsável pelo processamento de toda a informação proveniente do bloco de Dados. Para tal, este bloco possui três módulos que fazem o tratamento dos dados, obtêm o trânsito de potência e calculam os resultados necessários para satisfazer todas as funcionalidades propostas pela nZEBt.

O formato da informação proveniente do bloco de Dados, mais especificamente do módulo IE, não corresponde ao formato suportado pela nZEBt, visto que as entidades externas não têm um formato de dados uniformizado e compreendem diferentes resoluções temporais. É, portanto, através do módulo Tratamento de Dados (TD) que é feito o tratamento desta informação, de modo a garantir que a mesma está em conformidade com o formato suportado pela ferramenta.

O módulo Trânsito de Potência (TP) permite obter o trânsito de potência da RDBT. Os dados a obter do trânsito de potência são as amplitudes e argumentos das tensões em todos os barramentos, as potências ativa e reativa a transitar em cada um dos troços da rede e os valores das perdas totais por efeito de Joule do sistema. Os valores obtidos são referentes a um dia típico de um mês escolhido pelo utilizador.

Para o cálculo de resultados foi implementado o módulo Cálculo de Resultados (CR), que considera os valores de saída do módulo TP. Neste módulo são calculados todos os resultados provenientes do estudo efetuado. Alguns destes resultados são apresentados ao utilizador através de uma janela da nZEBt que apresenta um sumário de valores máximos e mínimos (especificados em 3.3.2.8) importantes para o estudo da rede. Outros resultados são gerados e armazenados em ficheiros, permitindo assim um posterior acesso, não perdendo esta informação aquando do fim da simulação.

3.2.4 – Entidade

O bloco Entidade é responsável pelo armazenamento e gestão dos dados provenientes dos estudos efetuados. Desta forma, é criada uma base de dados local, no computador do utilizador, onde se armazenam todos os dados referentes aos projetos existentes.

O módulo Gestão de Projetos (GP), no qual assenta o armazenamento de dados da ferramenta, é responsável por fazer a gestão de toda a informação referente a cada um dos projetos, sendo que esta gestão pode passar pelo armazenamento ou pela eliminação dos dados. Quando um projeto é criado, automaticamente é alocado um espaço em memória para guardar todos os dados referentes a esse mesmo projeto. Desta forma, à medida que são introduzidos dados na ferramenta (provenientes dos módulos GDP e GEE), estes são tratados, sendo seguidamente guardados na diretoria do referido projeto com o formato já suportado pela nZEBt. O módulo GP encarrega-se de armazenar estes dados, possibilitando o posterior acesso aos mesmos, deixando, assim, a nZEBt de estar dependente dos dados inicialmente introduzidos pelo utilizador (estes podem mesmo ser apagados). É na diretoria de cada projeto que são também armazenados os resultados provenientes do estudo efetuado. Se o utilizador desejar apagar um projeto, o módulo GP trata de libertar este espaço em memória, apagando assim toda a informação referente ao projeto a eliminar. A comunicação bi-direcional entre os blocos Computação e Entidade permite a gravação e a abertura de projetos previamente guardados.

3.3 – Implementação

Neste subcapítulo é descrita toda a implementação do modelo conceptual anteriormente apresentado. Inicialmente será especificada a tecnologia utilizada para a implementação da ferramenta, bem como o ambiente de desenvolvimento e o porquê desta escolha. De seguida será descrita, em detalhe, a implementação de cada um dos módulos constituintes do modelo arquitetural.

3.3.1 – Tecnologia utilizada

A implementação da ferramenta nZEBt foi realizada no ambiente de desenvolvimento integrado (IDE) Microsoft Visual Studio 2015. Este IDE é utilizado para desenvolver aplicações para o Microsoft Windows, bem como web sites ou aplicações web. A escolha do IDE recaiu sobre o Microsoft Visual Studio 2015 porque este apresenta uma grande versatilidade de ferramentas para a construção de interfaces gráficas, assim como uma capacidade integrada para o suporte do desenvolvimento de código, com análise estática dos dados, aumentando assim a qualidade e confiabilidade do código. O facto de ser uma ferramenta Microsoft, possibilita a integração com outras

ferramentas deste sistema, nomeadamente o Microsoft Office, oferecendo um vasto leque de bibliotecas e classes já definidas e prontas a utilizar.

A linguagem de programação utilizada para o desenvolvimento dos vários blocos da ferramenta foi o C#, que se apresenta como uma linguagem de alto nível, orientada a objetos e com capacidade de satisfazer todas as necessidades inerentes ao modelo conceptual. Esta linguagem combina as características mais importantes das linguagens C e C++, tornando-a numa linguagem verdadeiramente modernizada e poderosa.

3.3.2 – Detalhe do Modelo Arquitetural

Os módulos constituintes dos blocos Interface, Computação e Entidade foram desenvolvidos através de vários procedimentos integrados numa única classe do tipo *Form*. Esta classe representa uma janela que compõe a interface da ferramenta nZEBt. A classe contém construtor, propriedades, eventos e métodos. O construtor tem como propósito a inicialização de uma nova instância da classe, enquanto as propriedades encarregam-se do aspeto da *Form* criada. Através das propriedades é possível alterar parâmetros da janela, como o nome e tamanho, a localização onde esta será exibida ou definir quais as cores de fundo. Os eventos são respostas às ações do utilizador na *Form* e podem invocar métodos que executam determinados procedimentos.

A classe *Form* contém, portanto, um nível de apresentação e um nível de processamento de dados e computação. O nível de apresentação diz respeito à interface gráfica com o utilizador e constitui o módulo Interface com o Utilizador (IU). O nível de processamento de dados e computação é responsável pelo tratamento dos eventos provenientes das ações do utilizador e invoca métodos presentes nos módulos dos blocos Interface, Computação e Entidade.

3.3.2.1 – Gestão de Dados Personalizados (GDP)

O módulo de Gestão de Dados Personalizados (GDP) permite ao utilizador criar os seus próprios dados e introduzir os mesmos na nZEBt. Estes dados têm de seguir formulários pré-definidos e o formato reconhecido pela ferramenta é o formato de ficheiro de texto (.txt).

Os dados suportados pela ferramenta correspondem a dados de carga e dados da rede. Para os dados de carga, a ferramenta permite integrar os diagramas de carga diários

dos edifícios, expressos em potência ativa e reativa. Estes valores consideram um intervalo temporal de 1 ou 15 minutos. No que diz respeito aos dados da rede, a ferramenta lê o valor da impedância complexa de cada um dos troços da rede. Na Figura 3.6 é apresentado o módulo GDP.

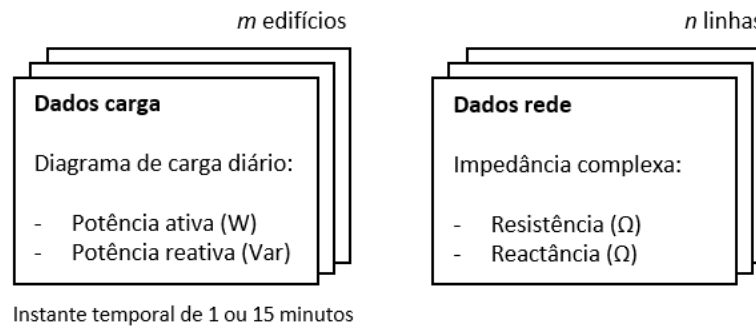


Figura 3. 6 – Módulo Gestão de Dados Personalizados (GDP)

O formulário para a introdução dos dados referidos é disponibilizado com o pacote de instalação da nZEBt e está representado na Figura 3.7, onde *n* representa o número de barramentos da rede. Para os dados da carga, o utilizador define o número do barramento onde irá introduzir o diagrama de carga diário e os valores de potência ativa e reativa para cada instante do dia, expressos na figura por *P* e *Q*, respetivamente. Para os dados da rede, é necessário introduzir quais os barramentos que são conectados por determinado troço da rede de distribuição. Desta forma, é introduzido o barramento de partida e de chegada, separados pelo caractere “_”. Os valores de resistência e reactância são expressos na por *R* e *X*, respetivamente.

Dois ecrãs de software são mostrados. O ecrã da esquerda, intitulado "Load Typefile.txt ...", apresenta uma tabela com duas colunas: "[Ts = 15m]" e "[Load]". A tabela contém 16 linhas de horários (de 00:00h a 03:15h) e a carga é indicada como "(P,Q)". O ecrã da direita, intitulado "Branches Typefile.txt ...", apresenta uma tabela com duas colunas: "[Line]" e "[Value]". A tabela contém 4 linhas: "1_2 (R,X)", "2_3 (R,X)", "...", e "n-1_n (R,X)".

Figura 3. 7 – Formulário para introdução de dados de carga e da rede

3.3.2.2 – Gestão de Entidades Externas (GEE)

Ferramenta PVGIS

No bloco geração, a nZEBt dá ao utilizador a possibilidade de adicionar geração fotovoltaica a cada um dos edifícios, considerando o mês do ano e a localização do edifício. Para tal utiliza a ferramenta Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), desenvolvida pelo *Joint Research Centre* (JRC) da Comissão Europeia.

Através de bases de dados Europeias de radiação solar e de dados meteorológicos, a ferramenta PVGIS estima quais serão os valores de irradiância solar global e temperatura média de um dia típico de um mês, numa determinada localização. Os valores de radiação solar diários são obtidos através de técnicas de interpolação integradas num modelo que estima a irradiância solar global numa superfície horizontal ou inclinada. Este modelo tem em conta, para cada instante do dia, a obstrução da radiação solar, que pode ser causada por vales ou montanhas. Os dados meteorológicos foram recolhidos através de valores de temperatura ambiente média provenientes de cerca de 800 estações meteorológicas, com um erro de interpolação entre 0.5 e 0.7 °C. Para ambos os valores de irradiância solar e temperatura média, o instante temporal diário obtido é em intervalos de 15 minutos e a resolução do mapa Europeu considerada é de 1x1km [34].

De modo a obter os valores de irradiância solar global e temperatura média para um dia típico de um mês, numa determinada localização, a ferramenta PVGIS considera os seguintes parâmetros de entrada:

- Localização do edifício;
- Mês do ano;
- Inclinação dos módulos fotovoltaicos [0°; 90°];
- Azimute dos módulos fotovoltaicos [-180°; 180°].

A ferramenta PVGIS apresenta também uma opção que permite otimizar os valores de inclinação e azimute, se o utilizador assim o entender. Os valores de saída do modelo podem ser apresentados através de uma página *web*, de um ficheiro de texto ou em formato pdf. Na Figura 3.8 é demonstrada a saída do modelo através de um ficheiro de texto (formato utilizado pela nZEBt), onde G representa a irradiância global, G_d a irradiância difusa (ambas num plano fixo e dadas em W/m^2) e T_d a temperatura média em cada instante, dada em °C.

dailyrad384323N_090943W_35deg_0deg.txt - Bloco ...

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

Latitude: 38°43'23" North,
Longitude: 9°9'43" West

Results for: January

Inclination of plane: 35 deg.
Orientation (azimuth) of plane: 0 deg.

Time	G	Gd	Td
04:37	0	0	9.1
04:52	0	0	9.1
05:07	0	0	9.0
05:22	0	0	9.0
05:37	0	0	9.0
05:52	0	0	9.0
06:07	0	0	9.0
06:22	0	0	8.9
06:37	0	0	9.0
06:52	0	0	9.0
07:07	0	0	9.0
07:22	0	0	9.1
07:37	65	32	9.1
07:52	108	51	9.2
08:07	159	74	9.3
08:22	203	87	9.4
08:37	244	99	9.6
08:52	283	110	9.7
09:07	320	120	9.9
09:22	355	129	10.1
09:37	387	136	10.4
09:52	416	143	10.6
10:07	443	149	10.9
10:22	467	154	11.2
10:37	487	158	11.5
10:52	505	161	11.8
11:07	520	164	12.0

dailyrad384323N_090943W_35deg_0deg.txt - Bloco ...

Ficheiro Editar Formatar Ver Ajuda

11:22	532	166	12.3
11:37	542	168	12.6
11:52	548	169	12.9
12:07	551	169	13.1
12:22	551	169	13.3
12:37	548	169	13.5
12:52	542	168	13.7
13:07	532	166	13.9
13:22	520	164	14.0
13:37	505	161	14.1
13:52	487	158	14.2
14:07	467	154	14.3
14:22	443	149	14.3
14:37	416	143	14.3
14:52	387	136	14.2
15:07	355	129	14.1
15:22	320	120	14.0
15:37	283	110	13.8
15:52	244	99	13.7
16:07	203	87	13.5
16:22	159	74	13.2
16:37	108	51	13.0
16:52	27	26	12.7
17:07	0	0	12.5
17:22	0	0	12.2
17:37	0	0	12.0
17:52	0	0	11.7
18:07	0	0	11.5
18:22	0	0	11.3

G: Global irradiance on a fixed plane (W/m2)
Gd: Diffuse irradiance on a fixed plane (W/m2)
Td: Average daytime temperature profile (deg. C)

PVGIS (c) European Communities, 2001-2012

Figura 3. 8 – Saída do PVGIS em ficheiro de texto

A introdução destes parâmetros na ferramenta PVGIS é efetuada através da nZEBt. Para tal, o utilizador introduz na nZEBt os parâmetros de entrada do modelo PVGIS. A ferramenta faz a gestão destes dados e, através de uma interface de comunicação com a ferramenta PVGIS, introduz automaticamente os referidos dados como entrada do modelo.

Modelo de Richardson

Para o bloco de procura de carga foi utilizado o modelo de alta resolução de procura de energia, desenvolvido por *Richardson et al* [35]. Este modelo de utilização doméstica de energia elétrica possibilita a obtenção de um diagrama de carga diário com a resolução temporal de 1 minuto. O diagrama de carga obtido através do modelo de Richardson contém apenas valores de potência ativa, no entanto, visto que é fornecido o valor do fator de potência de cada um dos equipamentos, é possível obter a potência reativa em cada instante, como será descrito mais à frente.

O padrão de utilização de energia elétrica numa habitação doméstica é fortemente dependente das atividades dos seus ocupantes e da utilização que estes fazem dos aparelhos elétricos. O modelo de Richardson baseia-se numa combinação de padrões de ocupação dos seus residentes e em perfis de atividade diária dos mesmos. A utilização de

equipamentos elétricos numa residência está, naturalmente, relacionada com o número de pessoas que estão em casa. Este período de tempo é referido como ocupação ativa e está representado para cada uma das habitações no modelo. O número de residentes é um dos parâmetros requeridos para o funcionamento do modelo, sendo que este valor pode variar de 1 a 5. O mês em que ocorre a simulação e o tipo do dia (durante a semana ou fim-de-semana) são também parâmetros a considerar pelo modelo, visto que impactam no perfil de atividade.

Por conseguinte, o modelo considera 3 camadas essenciais, sendo elas a ocupação ativa dos residentes, expressa pelo modelo de ocupação, a atividade diária dos residentes e a lista de equipamentos elétricos presentes numa residência convencional. Os equipamentos a considerar para determinada residência podem ser alocados aleatória ou manualmente.

Na Figura 3.9 está representada a arquitetura do modelo. À esquerda da figura tem-se os perfis de atividade diária, que representam a probabilidade dos residentes desenvolverem diferentes atividades em diferentes períodos do dia. À direita estão representados os edifícios, sendo que a cada um é atribuído um perfil de ocupação e um conjunto de equipamentos instalados. Cada equipamento está associado a um dos perfis de atividade diária e, quando o modelo deteta a ativação do equipamento (através de uma simulação estocástica), é obtido o seu valor de consumo de potência ativa.

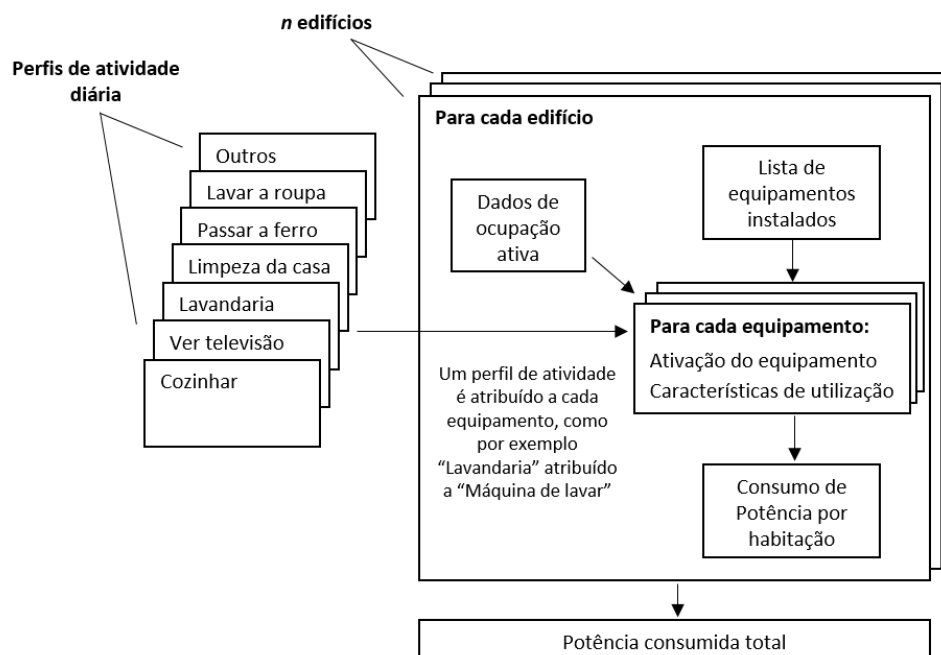


Figura 3. 9– Arquitetura do modelo de demanda de eletricidade. Adaptado de [35].

Um caso ilustrativo de uma simulação, para um dia de inverno, numa determinada residência, é demonstrado na Figura 3.10.

O modelo de Richardson foi desenvolvido na ferramenta Excel e está disponível para utilização gratuita. À semelhança do que acontece com os dados a introduzir na ferramenta PVGIS, os dados a introduzir no modelo de Richardson são também inseridos na nZEBt. De seguida, a ferramenta faz a gestão destes dados e, através de uma interface de comunicação com o modelo, introduz automaticamente os referidos dados como entrada do mesmo. Desta forma o utilizador precisa apenas de aceder à nZEBt para obter os dados necessários ao estudo da rede de distribuição a efetuar.

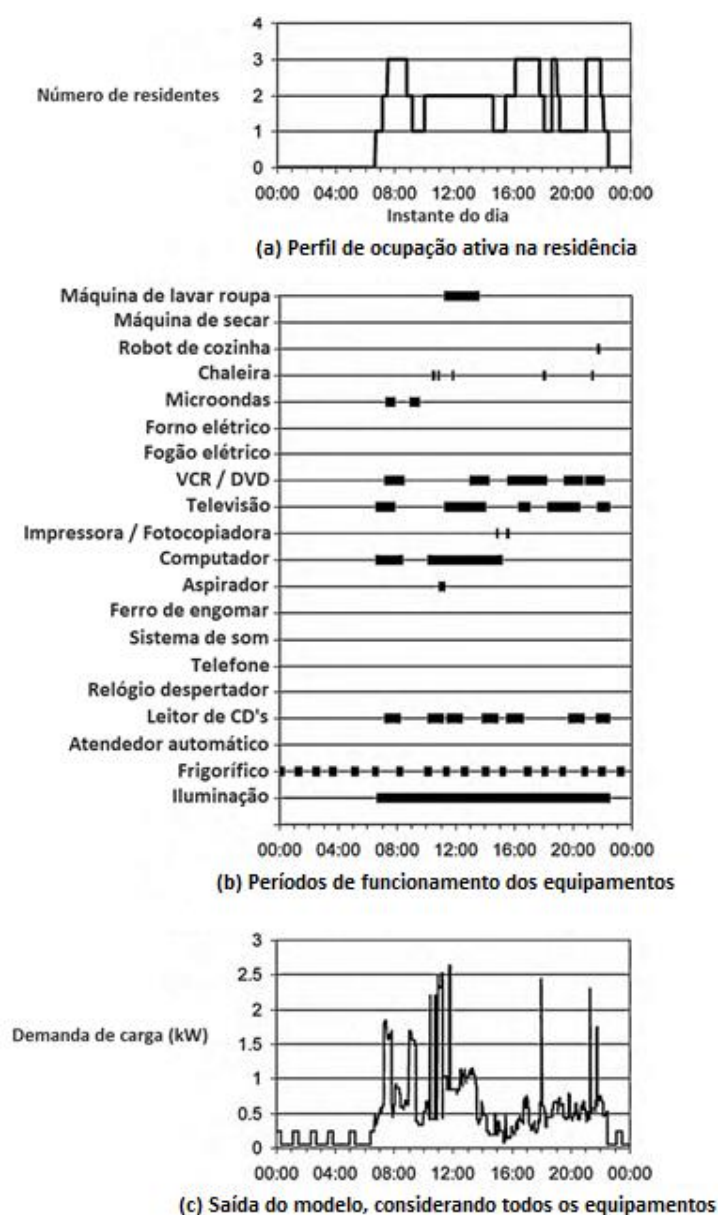


Figura 3. 10 – Exemplo de saída do modelo de Richardson (um edifício, dia de inverno). Adaptado de [35].

3.3.2.3 – Interface com o Utilizador (IU)

O módulo Interface com o Utilizador (IU) permite a comunicação entre o utilizador e a nZEBt. Para tal, foi desenvolvida uma interface gráfica no ambiente de desenvolvimento integrado Microsoft Visual Studio 2015, apresentada de seguida.

No menu horizontal podem ser observadas as componentes *File*, *Settings* e *Help*. O menu horizontal foi implementado através da classe *MenuStrip*. A opção *File* permite ao utilizador criar um novo projeto, abrir um projeto já existente, gravar ou apagar um projeto e sair da ferramenta. Quando a opção file é selecionada, o menu horizontal expande-se, mostrando as opções previamente referidas, como pode ser observado na Figura 3.11.

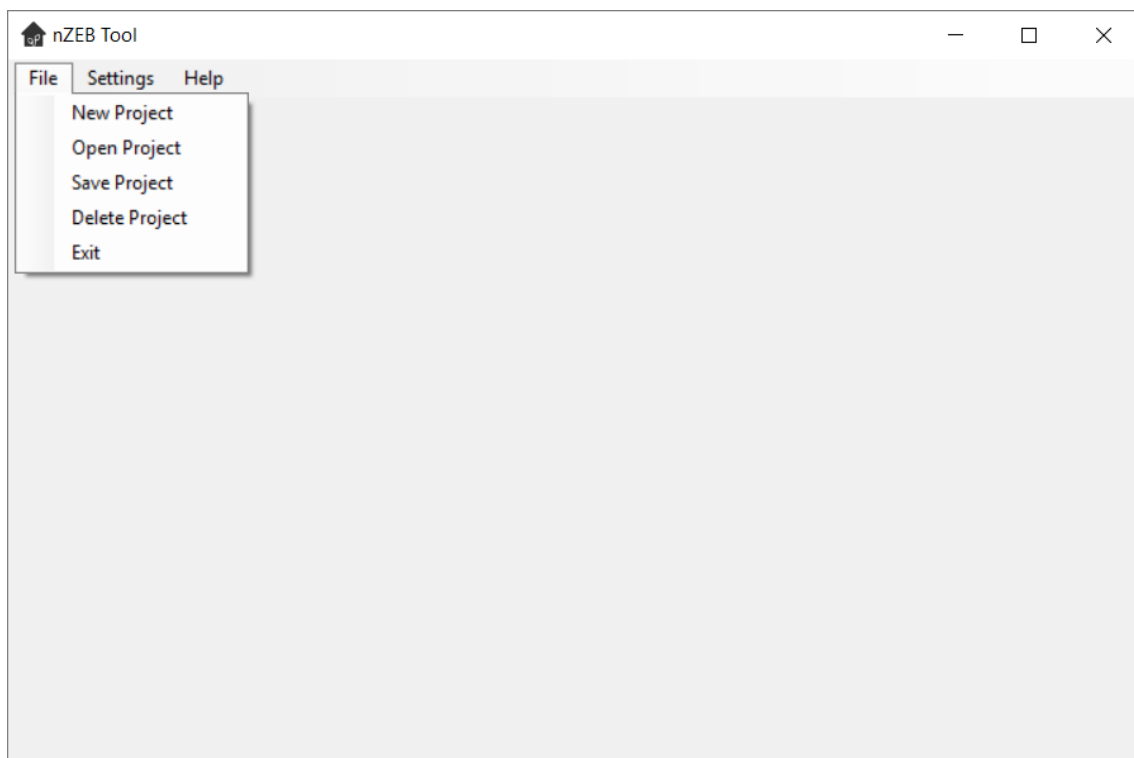


Figura 3. 11 – Opção File

Ao seleccionar a opção *Settings* o utilizador terá acesso a uma janela de definições onde poderá introduzir alguns valores que, apesar de estarem pré-definidos, são possíveis de alterar. Estes valores dizem respeito a parâmetros de geração fotovoltaica e a valores correspondentes ao método de resolução do trânsito de energia, pormenorizado em 3.3.2.7. Para os valores referentes a uma instalação fotovoltaica, pode ser definida a temperatura nominal de funcionamento da célula, ou NOCT, e o coeficiente de

temperatura para a potência máxima, α . Relativamente ao método associado ao trânsito de energia, podem ser definidos o número máximo de iterações e o valor de tolerância a ser considerado. É possível verificar a janela de definições na Figura 3.12.

A última opção do menu horizontal é a opção *Help* que permite ao utilizador entrar em contacto com o autor da ferramenta. Esta janela está representada na Figura 3.13. Ambas as janelas, *Settings* e *Help* correspondem a elementos da classe *Form*.

Figura 3. 12 – Janela proveniente da opção *Settings*

Figura 3. 13 – Janela proveniente da opção *Help*

Uma vez aberto ou iniciado um projeto, na interface gráfica da ferramenta é apresentado o nome do projeto, seguido do texto “(Running)”, no canto superior esquerdo. Esta informação, tal como toda a restante que corresponda a texto, é introduzida através da classe *Label*.

No decorrer de um projeto, são também apresentados dois grupos da classe *GroupBox* que permitem a introdução de dados pelo utilizador, através de elementos da classe *TextBox*, e a escolha de opções, através de elementos da classe *CheckBox* e *RadioButton*. A classe *TextBox* permite criar caixas de texto onde o utilizador introduz os valores a considerar pela ferramenta. Para escolher entre duas opções, são utilizados elementos da classe *RadioButton*, que permitem selecionar uma única opção entre duas ou mais. Este elemento é utilizado para possibilitar a escolha da resolução temporal. A

classe *CheckBox* permite de entre uma lista de dados, escolher quais os que serão selecionados.

À esquerda está representado o grupo da classe *GroupBox* que corresponde aos parâmetros base da rede de distribuição elétrica de BT. Neste grupo, o utilizador tem também, de seleccionar o instante temporal que será considerado no estudo, podendo escolher entre um intervalo de tempo de 1 ou 15 minutos. Os parâmetros da rede a introduzir são os referidos em 3.1.2.

À direita tem-se o grupo *Network*, também implementado através da classe *GroupBox*, que incorpora os separadores *BUS*, *Branches*, *Load* e *Power Flow*. A classe utilizada para criar os separadores referidos foi a classe *TabControl*. Visto que é possível ter, na RDBT, barramentos sem carga, ou seja, um barramento que não esteja conectado a um edifício, é necessário que o utilizador introduza quais os barramentos que têm uma carga associada. Desta forma, com base no número de barramentos introduzidos no campo “*Nº of Buses*”, é gerada automaticamente uma lista dos barramentos da rede. Esta lista vai de um (barramento de referência) até n , sendo n o número de barramentos. De notar que não é possível ao utilizador introduzir uma carga no barramento 1, sendo que este é o nó de saída do transformador MT/BT. Na Figura 3.14 são apresentados os dois grupos e o separador *BUS*.

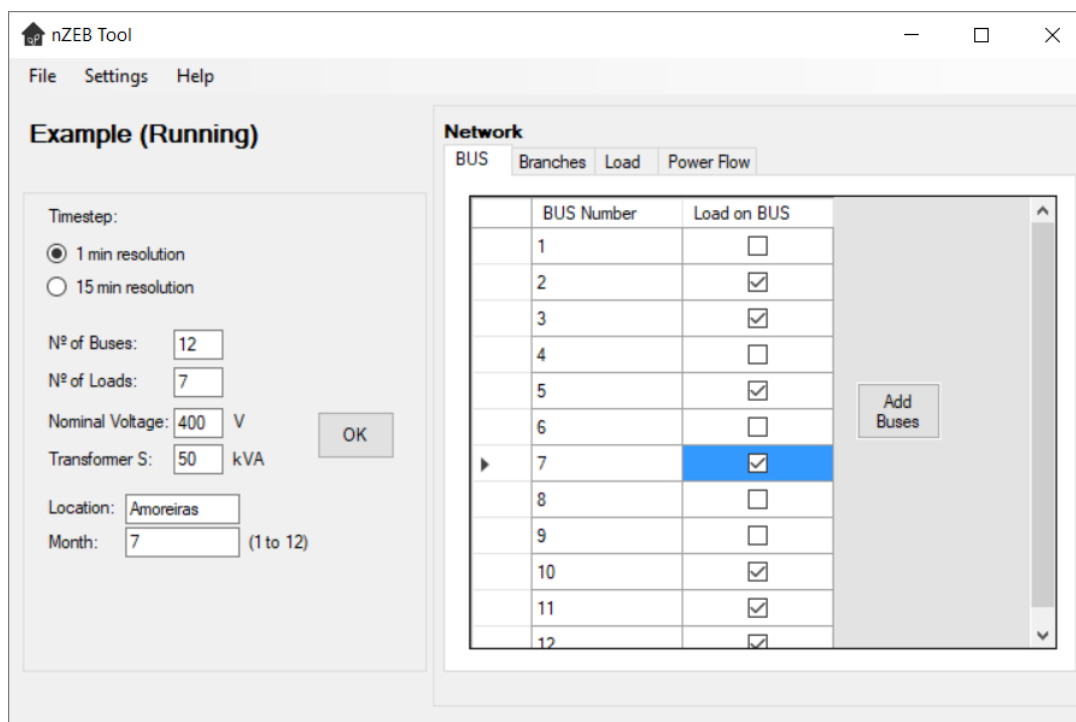


Figura 3. 14 – Interface gráfica da ferramenta, separador *BUS*

A introdução dos valores de impedância complexa de cada um dos troços da rede é feita no separador *Branches*. Para tal, está implementado um método que permite ao utilizador localizar o ficheiro no computador e carregar o mesmo na ferramenta. Para a implementação deste método foi utilizada a classe *OpenFileDialog*. A Figura 3.15 apresenta a janela referida.

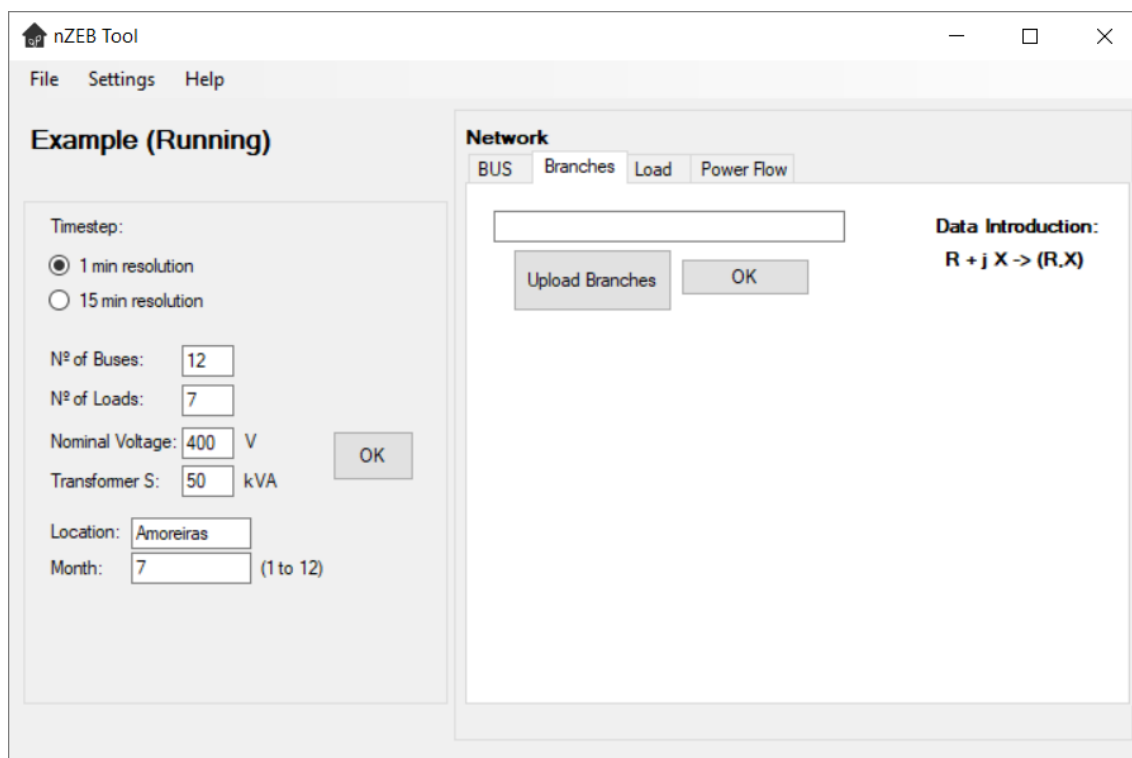


Figura 3. 15 – Interface gráfica da ferramenta, separador *Branches*

É no separador *Load* que o utilizador vai, para cada um dos barramentos com carga associada, adicionar o respetivo diagrama de carga diário. Inicialmente, é necessário definir qual o número do barramento onde se deseja introduzir a carga. Para tal, em “*Load on BUS n.º:*”, o utilizador tem de introduzir o número do barramento. Se o barramento escolhido não corresponder a um barramento previamente definido como um barramento com carga associada, a ferramenta mostra uma mensagem a dizer que não é possível introduzir uma carga no barramento escolhido. Como referido anteriormente, este perfil de carga pode ser introduzido através de um ficheiro de texto ou gerado pelo diagrama de Richardson. Para a introdução do diagrama através de dados personalizados o processo é análogo ao implementado no separador *Branches*, sendo que para carregar o ficheiro, o utilizador localiza o mesmo no seu computador e introduz na nZEBt. Se o diagrama for gerado pelo modelo de Richardson, é necessário que o utilizador indique qual o número

de residentes na casa e especifique se é um dia da semana ou fim-de-semana. O mês do ano, introduzido anteriormente, é também considerado no modelo. Ao clicar em “*Generate Load Profile*”, a nZEBt acede ao ficheiro Excel do modelo de Richardson e, com base nos parâmetros introduzidos, obtém o diagrama de carga diário.

A integração de geração fotovoltaica num edifício é também feita neste separador. Ao escolher o barramento no qual quer introduzir o sistema fotovoltaico, o utilizador terá de preencher os campos que correspondem aos parâmetros da instalação. Os parâmetros a introduzir são:

- Potência de pico da instalação [kW];
- Eficiência do inversor DC/AC [%];
- Perdas totais da instalação [%];
- Inclinação [0°; 90°];
- Azimute [-180°; 180°].

Estes parâmetros estão pré-definidos, e encontram-se nos respetivos campos de texto, no entanto o utilizador pode colocar os valores que desejar. A ferramenta permite ao utilizador escolher se pretende otimizar os valores de inclinação e azimute. A localização e o mês do ano, introduzidos anteriormente, são também parâmetros de entrada do modelo de geração fotovoltaica, assim como os valores de temperatura nominal de funcionamento da célula (NOCT) e coeficiente de temperatura para o máximo valor de potência (α). Os valores do NOCT e de α , como referido anteriormente, também estão pré-definidos mas é possível, para cada nó da rede, definir quais são os valores a considerar, através do acesso a *Settings*. Através do botão “*Generate PV Generation*”, a ferramenta acede ao PVGIS e retira os valores de irradiância global solar e temperatura média para um dia típico do mês e localização selecionados. O separador *Load* pode ser visto na Figura 3.16.

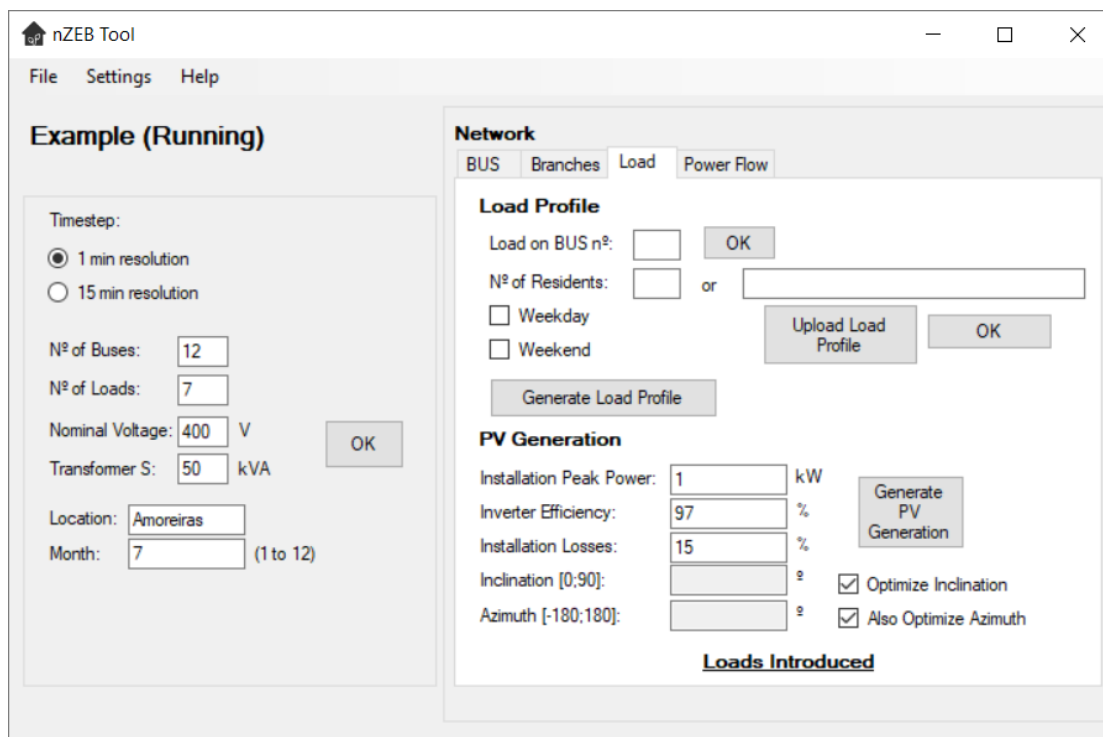


Figura 3. 16 – Interface gráfica da ferramenta, separador *Load*

Foi implementado um procedimento de controlo designado “*Loads Introduced*”, que permite ao utilizador verificar quais foram os barramentos nos quais já introduziu uma carga. Caso a rede a estudar seja uma rede com muitos barramentos, é importante ter este controlo, de modo a garantir que todas as cargas são introduzidas. Este controlo lista todos os barramentos que foram considerados anteriormente como barramentos com uma carga associada. Se a carga já estiver introduzida na ferramenta, o número do barramento aparece selecionado. A janela correspondente ao controlo *Loads Introduced* é apresentada na Figura 3.17.

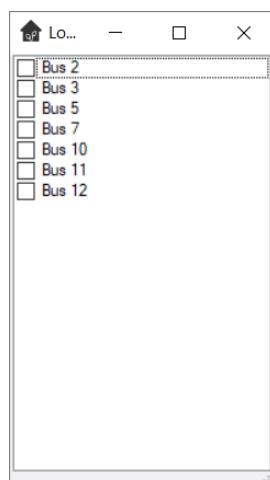


Figura 3. 17 – Janela de controlo *Loads Introduced*

Para obter o trânsito de energia, o utilizador pode seleccionar a opção “*Solve*”, disponível no separador *Power Flow*. Quando todos os dados forem introduzidos e, caso o utilizador não queira proceder a mais nenhuma alteração, poderá clicar em *OK*, obtendo, desta forma, o trânsito de energia para a rede de distribuição de Baixa Tensão a estudar. Este separador pode ser visto na Figura 3.18.

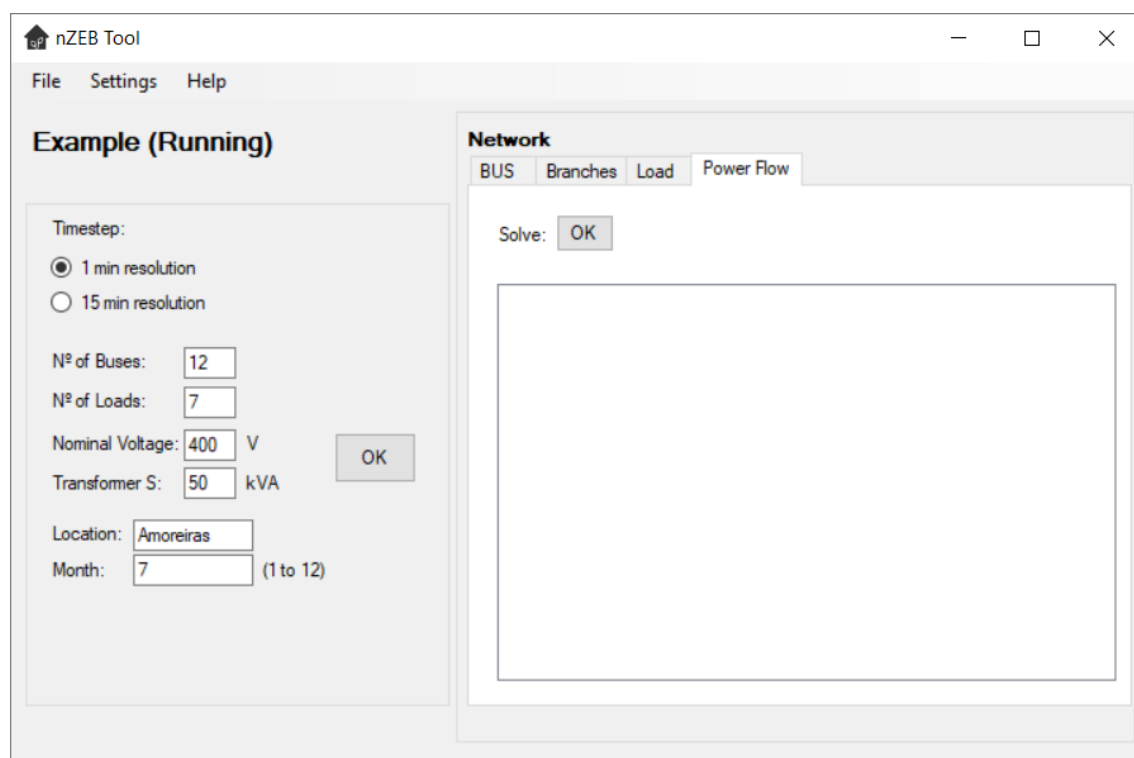


Figura 3. 18 – Interface gráfica da ferramenta, separador *Power Flow*

É também apresentado, no quadrado branco que pode ser visto na Figura 3.18, um resumo de informação importante da rede, proveniente do estudo efetuado. Esta componente de apresentação de resultados será explicada mais pormenorizadamente à frente.

3.3.2.4 – Interface com os Dados Personalizados (ID)

Os algoritmos desenvolvidos neste módulo permitem aceder a um ficheiro de texto e guardar a informação em variáveis da nZEBt para posterior utilização. Os ficheiros a aceder são os ficheiros com informação correspondente aos diagramas de carga diários e às linhas da rede de distribuição elétrica de Baixa Tensão.

Inicialmente, o utilizador escolhe qual o ficheiro a carregar na ferramenta, através de “*Upload Branches/Load Profile*”, e, de seguida, clica em *OK*, como explicado em

Interface com o Utilizador (IU). Para permitir a escolha de um ficheiro é inicializada uma nova instância da classe *OpenFileDialog*. Ao fazê-lo, o método implementado guarda o caminho de localização do ficheiro e inicializa uma nova instância da classe *StreamReader*, com a localização do ficheiro como parâmetro de entrada. Desta forma, o ficheiro passado como parâmetro de entrada é aberto para leitura e lido através do método *file.ReadToEnd()*. Esta função lê todo o ficheiro e, através de um ciclo *for*, guarda os valores de impedância complexa de cada uma das linhas e, analogamente, os valores de potência ativa e reativa de cada um dos instantes do dia. Os valores lidos do ficheiro de texto são guardados num vetor bi-dimensional de números complexos. Se a leitura do ficheiro for bem-sucedida, é mostrada no ecrã uma janela a dizer que a operação foi efetuada com sucesso. Por fim, o ficheiro aberto para leitura é fechado, através do método *file.Close()*. Este processo está representado no fluxograma, que pode ser visualizado na Figura 3.19.

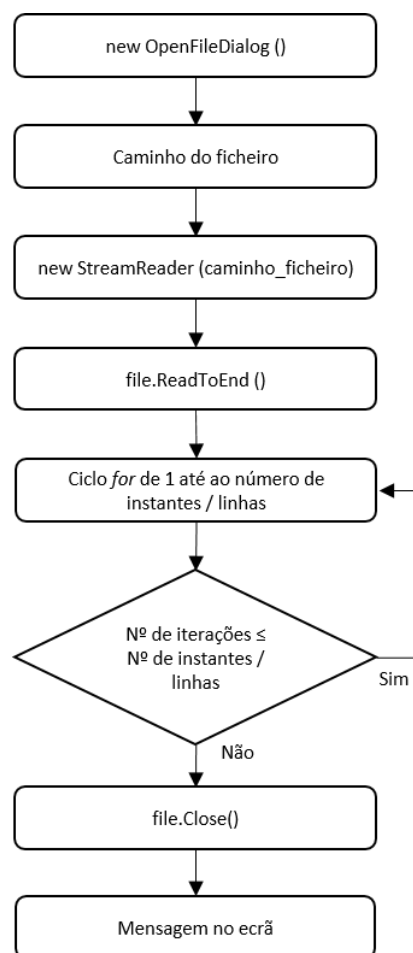


Figura 3. 19 - Fluxograma do módulo IP

Na Figura 3.20 são apresentadas as mensagens que mostram que a introdução de dados através de dados personalizados foi bem-sucedida.

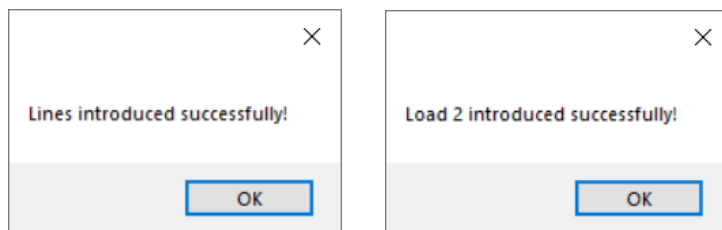


Figura 3. 20 - Mensagens de operação bem-sucedida ao introduzir dados personalizados

3.3.2.5 – Interface com as Entidades Externas (IE)

Interface com o Modelo de Richardson

Para o desenvolvimento do algoritmo que acede ao modelo de Richardson foi adicionado ao projeto o *Namespace Microsoft.Office.Interop.Excel*, que contém classes e métodos pré-definidos que permitem aceder a ficheiros Excel e realizar determinadas ações sobre os mesmos. Na implementação deste algoritmo foram utilizadas as classes *Application*, *WorkBook* e *WorkSheet*, todas presentes no *Microsoft.Office.Interop.Excel*.

Inicialmente, o algoritmo cria uma nova classe *Application*, com o nome *excel*. Associadas à classe *Application* são criadas novas instâncias das classes *WorkBook* e *Worksheet*, com os nomes *richardson* e *activesheet*, respetivamente. De seguida, os parâmetros de entrada do modelo (introduzidos pelo utilizador na nZEBt) são inseridos em cada uma das células correspondentes do ficheiro Excel. Estes parâmetros são o número de residentes na habitação, o tipo do dia e o mês do ano. A introdução destes valores no modelo de Richardson é feita através do método *activesheet.Cells[line,column]*, sendo que é necessário referir qual a linha e coluna da célula a ser alterada. Depois de inseridos os valores em cada uma das células, são alocados aleatoriamente os equipamentos à residência e são corridos os modelos de ocupação e de procura por energia elétrica. Estas três operações estão implementadas no modelo de Richardson através de três *macros*, sendo que é necessário executar as mesmas. Para tal, o método utilizado foi o *excel.Run(macro_name)*. De seguida é implementado um ciclo *for* e os valores do diagrama de carga diário são guardados num vetor bi-dimensional do tipo *Complex*. Caso a operação tenha sido bem-sucedida, é mostrada uma mensagem no ecrã a dizer que a carga foi introduzida com sucesso no barramento escolhido. Por fim, é necessário fechar o ficheiro Excel, assim como todos os processos que foram abertos e

estão a correr em *background*, libertando assim a memória utilizada. Esta operação é feita através dos métodos *Richardson.Close()*, *excel.Quit()* e *System.Runtime.InteropServices.Marshal.ReleaseComObject(excel)*. Na Figura 3.21 é apresentado o fluxograma que corresponde à interface de comunicação com o modelo de Richardson. Na Figura 3.22 é apresentada a mensagem de operação bem-sucedida.

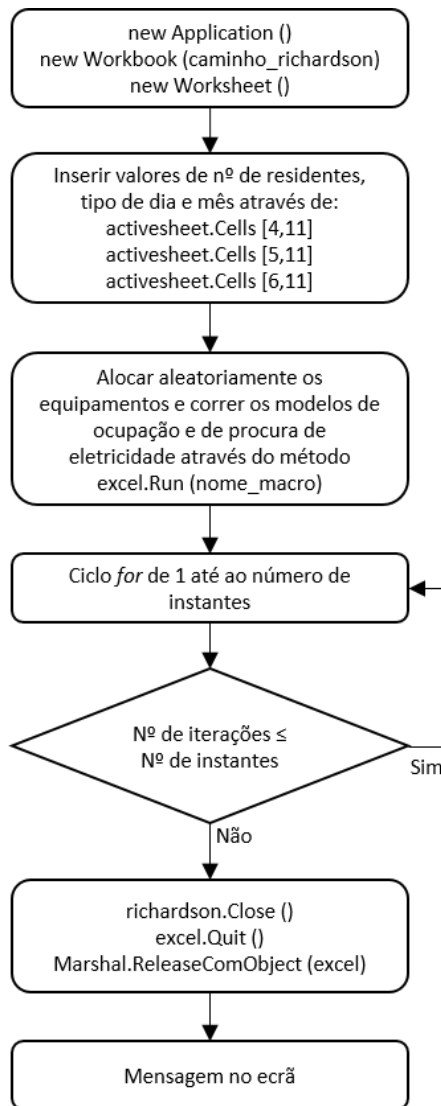


Figura 3. 21 - Fluxograma da Interface com o modelo de Richardson, módulo IE

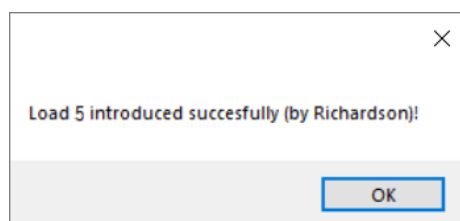


Figura 3. 22 - Mensagem de operação bem-sucedida ao introduzir uma carga pelo modelo de Richardson

Interface com a ferramenta PVGIS

O algoritmo desenvolvido para aceder aos dados de geração fotovoltaica permite aceder à ferramenta PVGIS e retirar os valores de irradiância solar global e temperatura média a cada instante do dia, dada uma localização e um mês do ano.

De modo a aceder a estes dados foi criada uma nova instância da classe *WebClient*. Esta classe fornece métodos que permitem enviar e recolher dados de um endereço, considerando o URI (*Uniform Resource Identifier*) do endereço. O URI representa o identificador do recurso e corresponde ao endereço *online* da ferramenta PVGIS.

Dada uma localização introduzida pelo utilizador na nZEBt, é utilizado o serviço Geocoding API, da Google, que permite converter endereços ou localizações em coordenadas geográficas. O acesso ao serviço Geocoding API é feito através de uma interface HTTP e os dados são obtidos no formato XML. Desta forma, através de uma localização, são obtidos os valores de latitude e longitude. Para obter os valores das coordenadas foi utilizado o método *WebClient.DownloadString*, que, dado um URI, descarrega toda a informação nele contida para uma variável do tipo *String*. Através desta *String* são retirados os valores das coordenadas de latitude e longitude.

A introdução dos parâmetros na ferramenta PVGIS é feita através do método POST. Este é um método de requisição, suportado pelo protocolo HTTP, que permite o envio de uma nova entidade de dados ao servidor, de forma a criar ou atualizar um recurso. Desta forma, para criar a entidade de dados, é inicializada uma nova instância da classe *NameValueCollection*, com o nome *valuesDR*, que contém toda a informação necessária para atualizar o recurso. Para a implementação do método de requisição POST foi utilizado o método *WebClient.UploadValues*, que carrega a coleção *valuesDR* no recurso especificado pelo URI. Este método retorna um vetor de *bytes* e considera 3 parâmetros de entrada, sendo eles o URI, o método de requisição e a coleção de dados. Para guardar os valores de saída, foi criado um vetor do tipo *Byte*, com o nome *resultDR*. O URI a considerar pode ser visto em baixo, onde está representada a implementação do método POST.

```
byte[] resultDR = webclient.UploadValues("http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/DRcalc.php", "POST", valuesDR);
```

Visto que o formato obtido (*Byte*) dos valores de irradiância e temperatura é de difícil interpretação, os mesmos são passados para o formato *String* através do método

Encoding.GetString, que considera o vetor *resultDR* como parâmetro de entrada. Este método decodifica todos os *bytes* no vetor e transforma-os numa *String*. Por fim, é implementado um ciclo *for*, que lê cada um dos instantes e guarda os valores de irradiância global solar e temperatura média em variáveis do tipo *Double*. Relativamente aos processos descritos anteriormente, se a operação for efetuada com sucesso, é mostrada no ecrã uma mensagem com essa informação.

Na Figura 3.23 é apresentado o fluxograma que representa a interface com a ferramenta PVGIS.

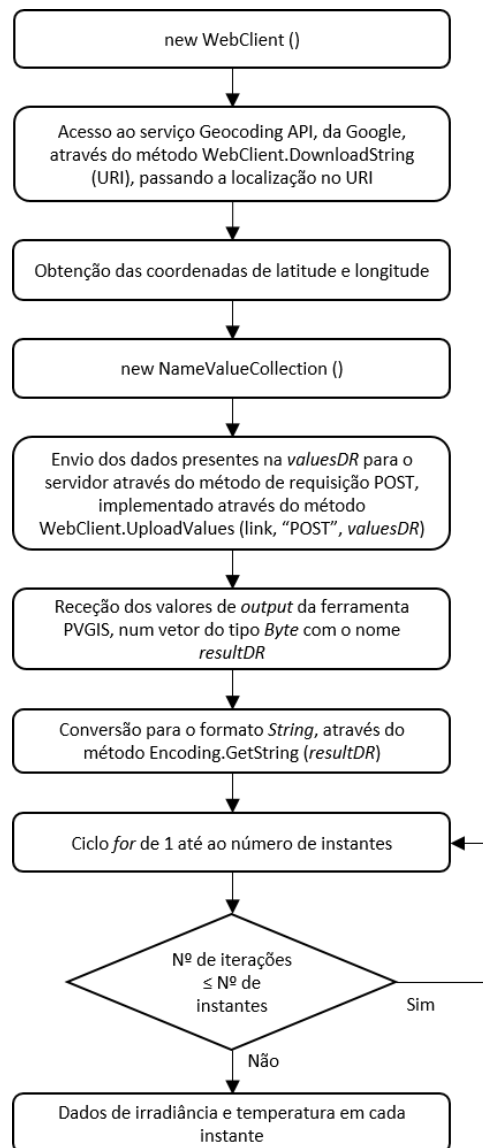


Figura 3. 23 - Fluxograma da Interface com a ferramenta PVGIS, módulo IE

3.3.2.6 – Tratamento de Dados (TD)

Os métodos desenvolvidos no módulo TD têm como entrada os dados provenientes do modelo de Richardson e da ferramenta PVGIS.

Para o modelo de Richardson foi implementado um procedimento e um método:

- 1) Procedimento Potência Reativa, que faz o cálculo da potência reativa consumida por cada equipamento, em cada um dos instantes de tempo;
- 2) Método 1_15 Richardson, que, a partir do diagrama de carga com resolução temporal de 1 minuto (proveniente do modelo de Richardson), origina um perfil diário de carga com uma resolução de 15 minutos.

Procedimento Potência Reativa

O Procedimento Potência Reativa recebe como entrada os valores de saída do modelo de Richardson, isto é, os valores de potência ativa em cada instante de tempo (em intervalos de 1 minuto). Na folha *Appliances*, do modelo desenvolvido por Richardson, está disponível o valor do fator de potência para cada um dos equipamentos considerados, bem como o seu consumo de potência ativa. Para calcular o valor de potência reativa não foi considerada a existência de harmônicas, isto é, considera-se a potência deformante nula. Deste modo, considera-se que o fator de potência é dado pela razão entre a potência ativa e a potência aparente, sendo assim possível obter o valor de potência reativa.

A arquitetura de alto nível do Procedimento Potência Reativa pode ser vista na Figura 3.24 e o processo implementado é apresentado na Figura 3.25, através de um fluxograma.

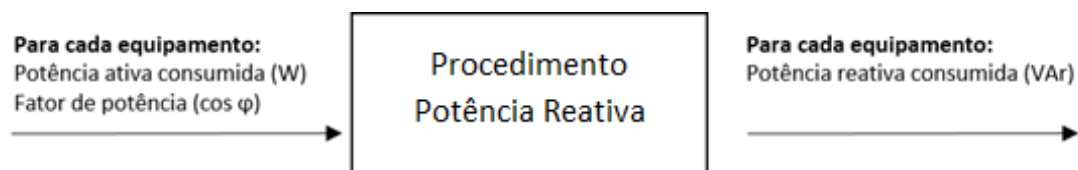


Figura 3. 24 - Procedimento Potência Reativa

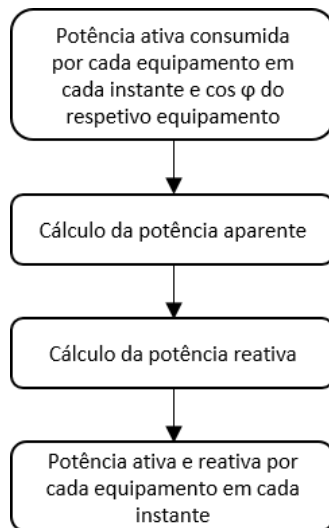


Figura 3. 25 – Algoritmo implementado para cálculo de potência reativa em cada instante

Método 1_15 Richardson

O Método 1_15 Richardson transforma a resolução temporal de 1 para 15 minutos, o que resulta numa diminuição no número de instantes considerados. Desta forma, os valores de potência ativa e reativa considerados são dados pela média de 15 valores. Esta operação é realizada com o objetivo de uniformizar a resolução temporal utilizada. O Método 1_15 considera os instantes 00:00h, 00:15h, 00:30h, 00:45h, como referido na Figura 3.26. Uma visão de alto nível deste método é apresentada na Figura 3.27.

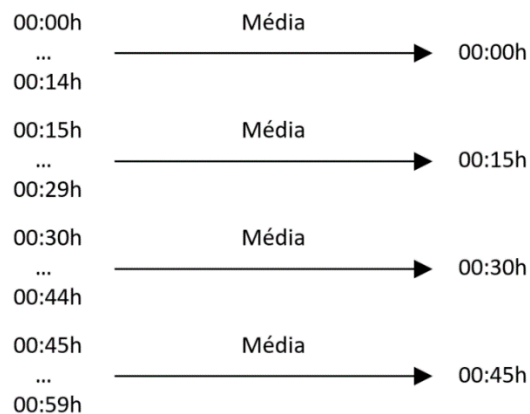


Figura 3. 26 – Instantes resultantes das médias efetuadas, por hora

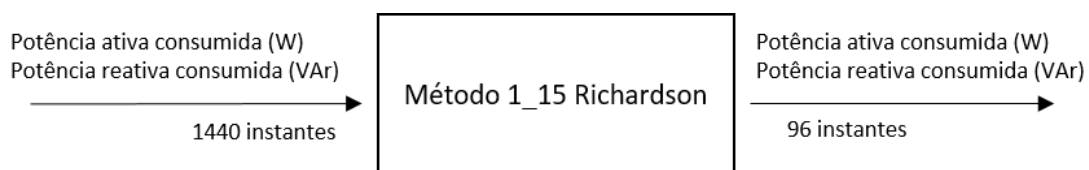


Figura 3. 27 – Método 1_15 Richardson

Para os dados provenientes da ferramenta PVGIS foram implementados três métodos:

- 1) Método Regressão Linear, que transforma a saída do PVGIS (15 minutos de resolução) numa resolução temporal de 1 minuto;
- 2) Método 1_15 PVGIS, análogo ao método 1_15 Richardson, no entanto com entradas diferentes;
- 3) Método PVGIS_Potência, que recebe os valores de irradiância global solar e de temperatura ambiente, bem como os parâmetros da instalação fotovoltaica a introduzir num barramento, e converte-os em potência ativa.

Método Interpolação Linear

O Método Interpolação Linear tem como entrada os valores de irradiância e temperatura retirados da ferramenta PVGIS. Estes valores apresentam uma resolução temporal de 15 minutos, como demonstrado na Figura 3.8. Caso o utilizador selecione a resolução de 1 minuto é necessário fazer a transição para esta resolução. Para tal, foi desenvolvido um método de interpolação linear, cuja visão é apresentada na Figura 3.28.

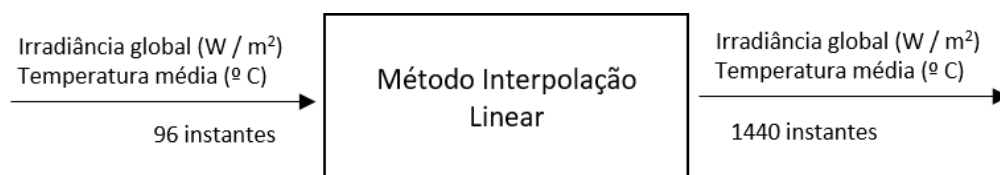


Figura 3. 28 – Método de regressão linear

Método 1_15 PVGIS

O Método 1_15 PVGIS permite passar novamente os valores convertidos em instantes de 1 minuto (através do método de regressão linear) para intervalos de 15 minutos. Este algoritmo não seria necessário se os valores de saída do PVGIS estivessem no formato correto, isto é, embora a resolução temporal seja a mesma, o formato dos valores é diferente do considerado pela ferramenta. Desta forma é implementado um método que recebe como entrada os dados provenientes do método de regressão linear e tem como saída os mesmos dados, contudo num instante temporal de 15 minutos. Esta transformação é semelhante à efetuada no Método 1_15 Richardson, que calcula a média de 15 valores e determina o valor para um instante. O formato de saída considerado foi o

mesmo do Método 1_15 Richardson e pode ser visto na Figura 3.27. A arquitetura de alto nível do método 1_15 PVGIS está representada na Figura 3.30.

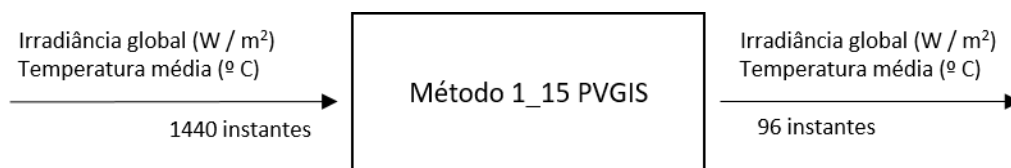


Figura 3. 29 – Método 1_15 PVGIS

Método PVGIS_Potência

O Método PVGIS_Potência obtém os valores de potência ativa gerada através de um determinado sistema fotovoltaico presente num nó da rede. Os valores de irradiância solar global e temperatura média são parâmetros de entrada do método. Estes valores têm a resolução temporal escolhida pelo utilizador, sendo que o método aceita os valores em ambas as resoluções (1 e 15 minutos). Os parâmetros da instalação fotovoltaica a introduzir num determinado nó da rede são, também, entradas do método. Estes parâmetros são a potência de pico da instalação fotovoltaica, em kW, o rendimento do inversor DC-AC, as perdas da instalação, a temperatura nominal de funcionamento da célula e o coeficiente de temperatura para a potência máxima. Com base nestes valores, o método implementado fornece a potência ativa gerada por aquela instalação fotovoltaica, naquele dado mês e na respetiva localização previamente definida. As fórmulas apresentadas neste método, para o cálculo da potência ativa gerada foram obtidas através das referências [36], [37] e [38], e correspondem a um determinado edifício e instante do dia. A arquitetura de alto nível do método é apresentada na Figura 3.31.

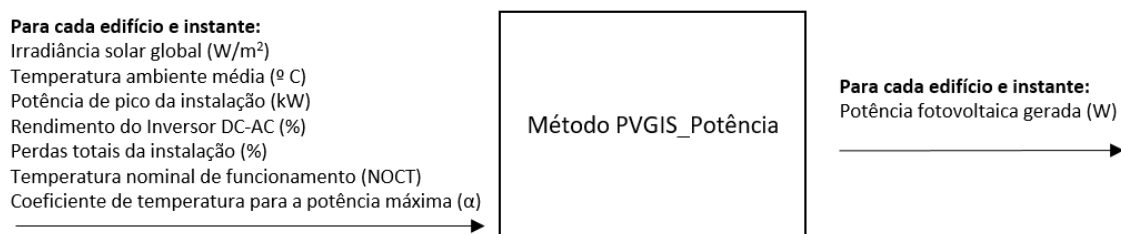


Figura 3. 30 – Método PVGIS_Potência

Inicialmente, o método começa por calcular o valor de temperatura das células fotovoltaicas, sendo que este valor tem forte impacto na produção de potência ativa. Para

este cálculo são considerados os valores de irradiância solar, temperatura ambiente média e de temperatura nominal de funcionamento da célula (NOCT). O valor de NOCT é dado, para cada módulo fotovoltaico, pela temperatura atingida por uma célula sob as seguintes condições:

- ✓ Irradiância solar = 800 W/m²;
- ✓ Temperatura ambiente = 20 °C;
- ✓ Velocidade do vento = 1 m/s;
- ✓ Ângulo de inclinação do módulo = 45 °

Este valor é dado por cada fabricante de uma tecnologia fotovoltaica e é sempre testado sob as mesmas condições. Uma expressão aproximada que permite calcular a temperatura de uma célula fotovoltaica (em °C) é dada pela Equação 3.1, onde θ_{amb} representa a temperatura ambiente no instante referido, $\theta_{amb,NOCT} = 20^{\circ}\text{C}$, $G_{NOCT} = 800$ W/m² e G representa o valor de irradiância solar no mesmo instante, em W/m².

$$\theta_{cel} = \theta_{amb} + \frac{NOCT - \theta_{amb,NOCT}}{G_{NOCT}} \times G \quad (3.1)$$

Para determinada tecnologia fotovoltaica é sempre facultado, pelo fabricante, o valor de potência de pico. Este valor é testado sob condições STC (Standard Test Conditions). As condições STC representam valores padrão de teste que a indústria utiliza para testar as tecnologias fotovoltaicas, sendo assim possível comparar com mais precisão diferentes tecnologias. As condições STC são:

- ✓ Irradiância solar = 1000 W/m²;
- ✓ Temperatura da célula = 25°C;
- ✓ Massa de ar (AM) = 1.5

O valor de potência de pico da instalação a introduzir na ferramenta pode considerar um ou mais módulos fotovoltaicos. Como referido, o valor de potência de pico de um módulo é quando o mesmo é testado sob condições específicas (STC). Contudo, é necessário ajustar este valor, de modo a considerar o valor real de irradiância solar para um dado instante. O valor obtido de potência fotovoltaica é dado em W e é obtido através da Equação 3.2, onde P_{pico} representa a potência de pico da instalação, em kW, e $G_{STC} = 1000$ W/m².

$$P_{FV}^G = \frac{P_{pico} \times G}{G_{STC}} \quad (3.2)$$

A temperatura da célula tem impacto na potência fotovoltaica produzida por uma instalação, sendo assim necessário considerar a mesma nos cálculos. Para tal foi utilizada a Equação 3.3, onde α representa o coeficiente de temperatura para a potência máxima e é considerada a variação de temperatura entre a temperatura da célula no instante em questão, θ_{cel} , e a temperatura da célula sob as condições STC, θ_{STC} .

$$P_{FV}(G, \theta_{cel}) = P_{FV}^G \left(1 + \frac{\alpha}{100} \times (\theta_{cel} - \theta_{STC}) \right) \quad (3.3)$$

Considerando o valor das perdas da instalação, introduzido pelo utilizador na nZEBt, obtém-se o valor de potência fotovoltaica DC, através da Equação 3.4, onde PV_{perdas} representa o valor total de perdas da instalação fotovoltaica, em percentagem.

$$P_{FV}DC = P_{FV} \times \frac{100 - PV_{perdas}}{100} \quad (3.4)$$

Para obter a potência fotovoltaica AC, é necessário considerar o rendimento do inversor DC-AC. O valor de potência fotovoltaica AC é calculado para cada edifício e instante, através da Equação 3.5.

$$P_{FV}AC = P_{FV}DC \times \frac{\eta_{inversor}}{100} \quad (3.5)$$

Na Figura 3.32 é apresentado o fluxograma que corresponde ao algoritmo implementado para o cálculo da potência fotovoltaica gerada por um edifício.

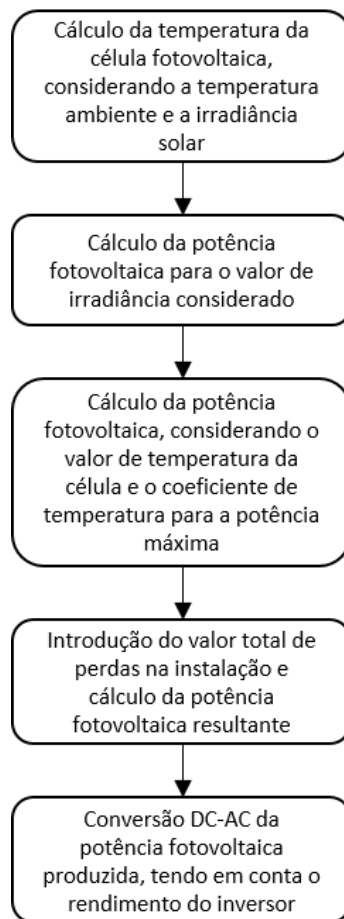


Figura 3. 31 – Algoritmo implementado para o cálculo da potência fotovoltaica produzida em cada instante, para cada edifício

3.3.2.7 – Trânsito de Potência (TP)

O módulo TP permite obter o trânsito de potência na rede de distribuição elétrica de Baixa Tensão. Visto que o estudo é efetuado ao longo de um dia, o trânsito de potência é resolvido para 96 ou 1440 instantes, dependendo da resolução temporal escolhida pelo utilizador. Para tal, foi desenvolvido o Modelo Trânsito Potência.

Modelo Trânsito Potência

As entradas do Modelo Trânsito Potência são a tensão nominal à saída do transformador MT/BT, o número de barramentos da RDBT, os valores de impedância complexa de cada um dos troços da rede de distribuição elétrica, o número de edifícios integrados na referida rede e o perfil diário de carga para cada um destes edifícios. São também entradas do modelo o número máximo de iterações e o valor de tolerância a considerar, sendo que estes dois valores estão pré-definidos e correspondem a 10 e 0,001, respetivamente. O trânsito de potência é obtido através de um método iterativo, sendo que

se o método não atingir a tolerância num número de iterações menor ou igual ao número máximo de iterações definido, diz-se que o método não converge. Para o método convergir, o valor máximo da diferença de tensão entre a iteração anterior e a presente tem, em cada instante, de ser menor que o valor da tolerância. Através do acesso às definições da ferramenta (dado por *Settings*, no menu horizontal) é possível o utilizador introduzir os valores desejados para o número máximo de iterações e tolerância. A resolução temporal, escolhida pelo utilizador, é também considerada no modelo. Os dados a obter do trânsito de potência são as amplitudes e argumentos das tensões em todos os nós da rede, as potências ativa e reativa a transitar em cada um dos troços da rede e os valores das perdas por efeito de Joule totais do sistema.

A visão de alto nível deste modelo é apresentada na Figura 3.33.

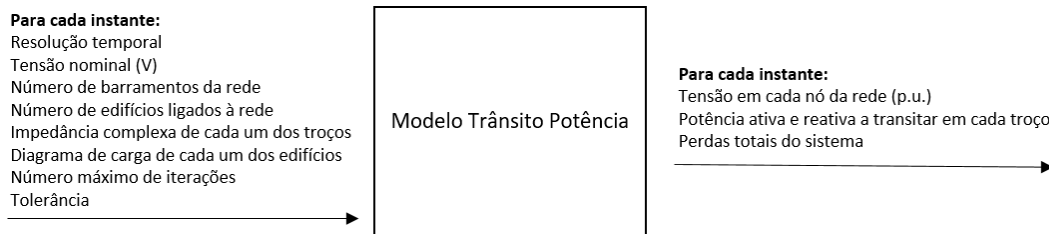


Figura 3. 32 – Modelo Trânsito Potência

O Modelo Trânsito Potência inicialmente vai ler, para cada instante do dia, os valores de procura de potência ativa e reativa de cada um dos barramentos da rede, assim como os valores de impedância complexa de cada um dos troços. Os valores de tensão em cada nó são convertidos em p.u.. De seguida, é implementado um ciclo até ao número máximo de iterações, ou até o método convergir, isto é, atingir a tolerância. Neste ciclo é sempre guardado o valor de tensão da iteração anterior, em cada um dos nós, nesse determinado instante, de modo a verificar a convergência. O valor da potência aparente S_i calculada em cada instante n , num determinado nó i é dado pela Equação 3.6, onde S_j representa a potência aparente no nó seguinte, V_{ij} a queda de tensão no troço considerado e Z_{ij} o valor de impedância complexa no mesmo troço.

$$S_i(n) = S_i(n) + S_j(n) + V_{ij}(n) \times \left(\frac{V_{ij}(n)}{Z_{ij}} \right)^* \quad (3.6)$$

Dados os valores de potência aparente, provenientes da equação anterior, são então atualizados os valores de tensão nodal em cada nó, através da equação 3.7.

$$V_j(n) = V_i(n) - Z_{ij} \times \left(\frac{S_j(n)}{V_j(n)} \right)^* \quad (3.7)$$

O algoritmo implementado que permite obter o trânsito de potência é apresentado na Figura 3.34, em que it corresponde ao número da presente iteração, V_{max} ao valor máximo da diferença de tensão entre a iteração anterior e a presente, \mathcal{E} à tolerância e max_it ao número máximo de iterações.

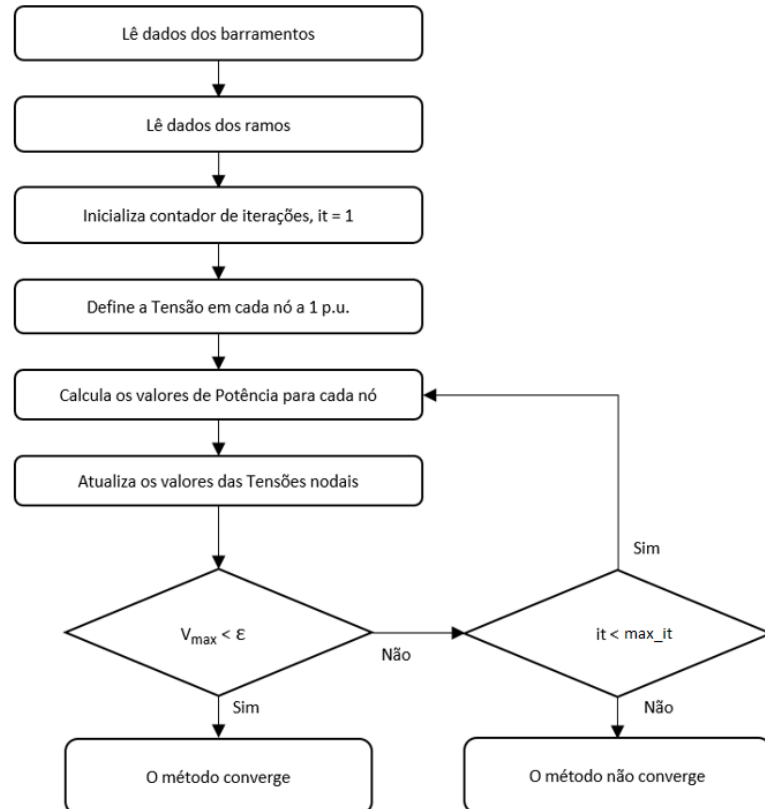


Figura 3. 33 – Algoritmo implementado para a obtenção do trânsito de potência

3.3.2.8 – Cálculo de Resultados (CR)

No módulo Cálculo de Resultados (CR) é efetuado todo o processamento que permite obter os dados resultantes do estudo de uma determinada rede de distribuição. Para tal, são considerados indicadores de performance que permitem obter um desempenho da RDBT. Os indicadores considerados são (valores obtidos para uma duração de 24 horas):

- Máximo e mínimo de tensão [V];
- Máximo e mínimo de pico de potência no transformador [kVA];
- Máximo e mínimo de perdas de potência [W];

- Perdas diárias de energia por efeito de Joule [Wh]

Para obter o valor de tensão em cada nó e instante é utilizada a Equação 3.7, proveniente do Modelo Trânsito Potência. O pico de potência no transformador é dado por $S_1(n)$, obtido através de 3.6. De modo a obter o valor de perdas por efeito de Joule, num dado instante n , foi utilizada a Equação 3.8

$$P_L(n) = \sum_{i,j=1,2}^{nb-1,nb} Re \left\{ V_{ij}(n) \times \left(\frac{V_{ij}(n)}{Z_{ij}} \right)^* \right\} \quad (3.8)$$

A equação 3.9 considera a resolução temporal escolhida pelo utilizador e dá o valor de perdas diárias de energia, onde P_{Ld} representa o valor total de perdas diárias e T_s representa o número de instantes considerado, podendo ter o valor 1440 ou 96, mediante a resolução temporal escolhida pelo utilizador (1 ou 15 minutos).

$$P_{Ld} = \frac{T_s}{24} \sum_{n=1}^{T_s} P_L(n) \quad (3.9)$$

Uma síntese dos resultados obtidos é apresentada na interface gráfica da nZEBt, através da janela “Summary”. Todos os resultados obtidos são guardados em ficheiros de texto e Excel, na pasta referente ao projeto criado.

3.3.2.9 – Gestão de Projetos (GP)

O bloco entidade utiliza uma base de dados local, alojada no computador do utilizador aquando da instalação da ferramenta. É nesta base de dados que será armazenada toda a informação referente aos projetos criados pela nZEBt.

Para satisfazer as necessidades do bloco Entidade, foi desenvolvido o módulo Gestão de Projetos (GP), responsável por toda a gestão de dados presentes na ferramenta. Este módulo possibilita a criação ou abertura de novos projetos, bem como a possibilidade de guardar ou eliminar um projeto existente. É também responsável por alocar aos projetos os dados provenientes da informação introduzida pelo utilizador, como os parâmetros da rede, os valores de impedância complexa de cada linha os diagramas de carga dos edifícios, a potência fotovoltaica produzida por cada edifício, bem como os dados resultantes do cálculo de resultados.

Caso de Estudo

Para testar a ferramenta desenvolvida, neste capítulo é apresentado o caso de estudo e os respetivos cenários a considerar de modo a efetuar o estudo de uma rede de distribuição de energia elétrica em Baixa Tensão. De seguida é apresentada a RDBT considerada no estudo, bem como os resultados obtidos através da nZEBt. Por fim é feita uma análise destes resultados.

4.1 – Cenários

Para o estudo a efetuar, foi considerada uma RDBT com 33 habitações, alimentadas pela mesma rede de distribuição de energia elétrica em Baixa Tensão. O número de edifícios considerado está de acordo com a rede radial de 34 barramentos (33 barramentos correspondentes aos edifícios e 1 barramento correspondente ao barramento de saída do transformador) do IEEE [39]. Para o horizonte temporal de 1 ano considerado, os 33 edifícios são submetidos a variações sazonais de irradiância solar e temperatura ambiente, sendo que estas impactam fortemente o consumo de energia e a geração fotovoltaica dos edifícios e, consequentemente, os indicadores de desempenho da rede na qual estes estão inseridos. O estudo compreende uma duração de 1 ano e considera dois cenários distintos.

Os cenários a considerar são:

- Cenário 1 – Apenas edifícios convencionais, sem geração fotovoltaica, compõem a rede.
- Cenário 2 – Todos os 33 edifícios foram convertidos em edifícios nZEB. Para converter os edifícios em nZEB foi calculado o consumo anual de energia de cada

edifício e, de seguida, adicionado um sistema fotovoltaico com a potência de pico que permite atingir um valor de energia fotovoltaica anual produzida igual ao consumo anual de energia para cada edifício.

A nZEBt faz o estudo diário de uma RDBT tendo em conta o mês escolhido para a simulação, obtendo o perfil diário de carga e a produção fotovoltaica para um dia típico do mês considerado. Para fazer o estudo anual foram efetuadas 12 simulações, cada uma correspondente a cada mês do ano, obtendo, desta forma, 1 ano de simulação.

Para ambos os cenários, é considerada a mesma RDBT e o mesmo valor de procura de energia elétrica por parte de cada edifício, no entanto, considera-se uma diferente incidência de edifícios nZEB na referida rede de distribuição. Deste modo, é possível analisar o comportamento da rede em função do número de edifícios convertidos em nZEB.

Para cada edifício, são obtidos perfis de diários de carga e perfis de geração de energia fotovoltaica. De modo a obter estes perfis são utilizados dados provenientes da ferramenta PVGIS, obtidos através da nZEBt, considerando a localização Amoreiras, Lisboa (Latitude: 38° 43' 23'' Norte; Longitude: 9° 9' 43'' Oeste). Os dados a obter são a irradiância global num plano horizontal e a temperatura ambiente. Na Figura 4.1 e 4.2 são apresentados os valores obtidos de irradiância global e temperatura, respetivamente, em função do instante do dia, para cada mês do ano.

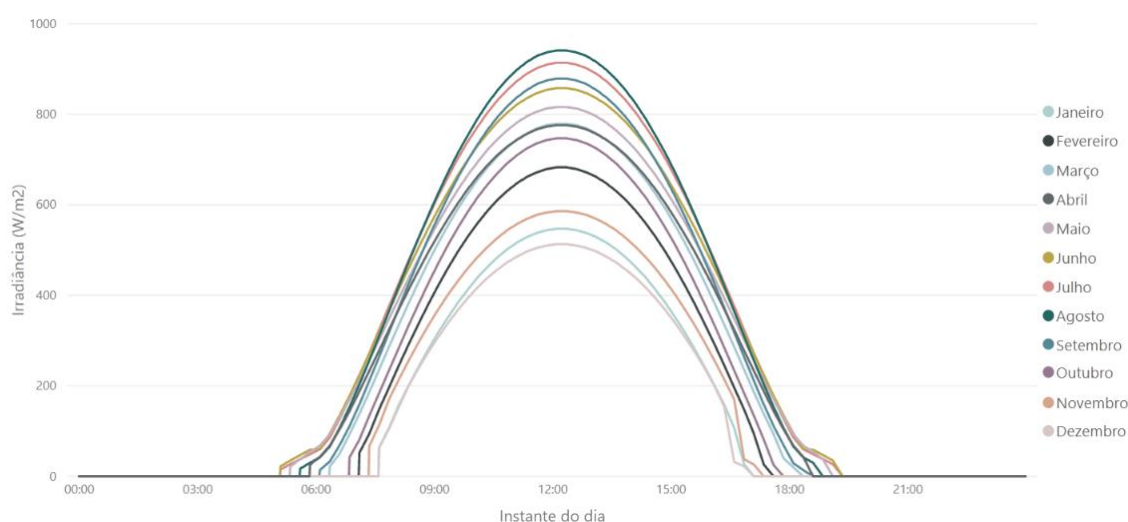


Figura 4. 1 - Dados de entrada de irradiância global

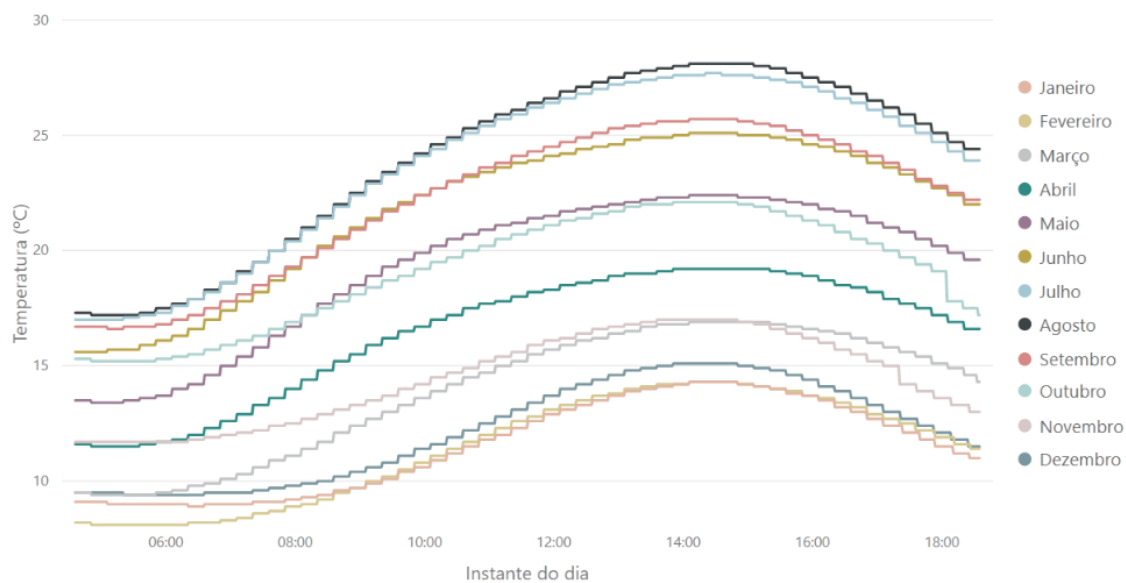


Figura 4. 2 - Dados de entrada de temperatura média

À semelhança da metodologia apresentada em [11], considerar-se-á a realidade Portuguesa de consumo de energia numa habitação, onde 68% da energia gasta para aquecimento resulta de biomassa, 78% da energia gasta para aquecimento de águas resulta do gás e é utilizada ventilação natural para garantir o conforto térmico no verão [40]. A utilização de eletricidade destina-se, maioritariamente, à alimentação de equipamentos e iluminação. Nas figuras 4.3 e 4.4 são apresentados o consumo de energia de uma habitação Portuguesa (considerada no estudo), por fonte de energia, para os fins de aquecimento interior e aquecimento de águas.

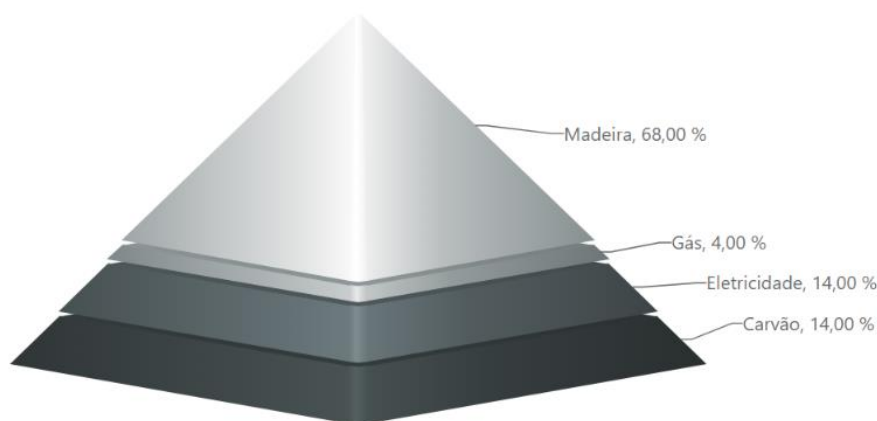


Figura 4. 3 - Consumo de energia utilizado para aquecimento interior, por fonte de energia. Adaptado de [40]

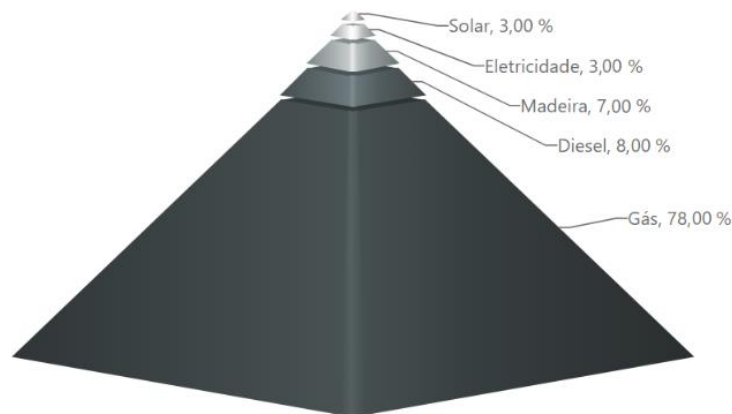


Figura 4. 4 - Consumo de energia utilizado para aquecimento de águas, por fonte de energia. Adaptado de [40]

Para refletir a realidade Portuguesa, é considerado que, para os 33 edifícios, é utilizada biomassa para aquecimento interior, gás para aquecimento de águas e eletricidade para iluminação e para alimentar os equipamentos elétricos presentes na residência.

Os diagramas de carga diários de cada edifício foram obtidos através da nZEBt, onde se recorreu ao modelo estocástico desenvolvido por Richardson para gerar os perfis de consumo de eletricidade. Através do modelo de Richardson é possível alocar aleatória ou manualmente os equipamentos elétricos a uma habitação. De modo a refletir a realidade atual Portuguesa não foram considerados os equipamentos de aquecimento interior e aquecimento de águas, bem como equipamentos pouco utilizados no panorama nacional atual (ex. fax). Os restantes equipamentos foram alocados aleatoriamente para cada um dos 33 edifícios. Os equipamentos considerados encontram-se apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. 1. Equipamentos elétricos considerados no estudo

Equipamento	Duração média de um ciclo [min]	Pot. Aparente média de um ciclo [VA]	Pot. Aparente em <i>stand-by</i> [VA]	Fator de potência
Arca congeladora	14	190	0	0.8
Frigorífico	18	110	0	0.8
Box da TV	73	27	15	1
Leitor de DVD	73	34	2	1
Sistema de som	60	100	9	1
TV 1,2,3*	73	124	3	0.9
Computador	300	141	5	0.9
Impressora	4	335	4	0.9
Ferro de engomar	30	1000	0	1
Aspirador	20	2000	0	1
Fogão	16	2400	1	1
Forno	27	2125	3	1
Micro-ondas	30	1250	2	1
Chaleira	3	2000	1	1
Robot Cozinha	3	1000	2	1
Máquina de lavar loiça	60	1131	0	0.8
Máquina de lavar roupa	138	406	1	0.8
Máquina de secar	60	2500	1	0.8
Iluminação	Dependente da utilização		0	1

* Existem 3 televisões a considerar no estudo.

No modelo ocupacional do modelo de Richardson, a probabilidade de alguns equipamentos operarem depende do número de residentes no respetivo edifício. Como dito anteriormente, o número de residentes é uma das entradas do modelo e varia de 1 a 5. Para os 33 edifícios, o número de ocupantes foi gerado aleatoriamente, assim como a sua posição na rede de distribuição em Baixa Tensão. Na Tabela 5 estão representados o número de ocupantes por edifício, a posição dos respetivos edifícios na rede, o pico de potência da instalação fotovoltaica de modo a converter os edifícios em edifícios nZEB e o consumo anual de energia.

Tabela 4. 2. Posição de cada edifício na rede de distribuição, número de residentes e consumo anual de energia

Nó da rede de distribuição	Número de residentes	Pico de potência da instalação fotovoltaica [kWp]	Consumo anual de energia [kWh]
2	1	1.54	2632.38
3	2	1.81	3103.15
4	4	2.08	3545.69
5	5	2.69	4579.25
6	2	2.13	3627.35
7	4	2.57	4386.39
8	5	2.46	4198.46
9	2	2.06	3505.39
10	1	1.34	2286.55
11	3	1.90	3243.61
12	1	1.51	2584.6
13	2	1.96	3341.78
14	5	2.20	3740.19
15	2	1.78	3031.13
16	3	1.97	3346.27
17	4	2.04	3478.65
18	5	2.85	4872.80
19	5	2.47	4219.53
20	5	2.36	4036.90
21	2	2.37	4057.12
22	3	1.81	3094.60
23	5	2.22	3795.98
24	5	2.49	4268.81
25	4	2.39	4079.08
26	3	2.51	4265.93
27	2	2.38	4038.44
28	1	1.37	2333.90
29	5	2.14	3627.94
30	5	2.31	3951.64
31	4	2.16	3688.52
32	3	2.12	3627.81
33	5	2.39	4091.60
34	3	2.11	3601.14

Para obter a potência de pico da instalação fotovoltaica de cada um dos edifícios, foram utilizados os valores provenientes das equações (2) à (6), presentes na secção 3.2.2.3, no Método PVGIS_Potência. Os parâmetros utilizados para os cálculos estão apresentados na Tabela 6.

Tabela 4. 3. Parâmetros considerados para a obtenção da potência de pico

Parâmetro	Valor	Unidade
PV_{perdas}	0.15	-
η_{inversor}	0.97	-
α	-0.45	% / °C
NOCT	45	°C
θ_{NOCT}	20	°C
G_{NOCT}	800	W/m ²
θ_{STC}	25	°C
G_{STC}	1000	W/m ²
Inclinação	Otimizado	°
Azimute	Otimizado	°

4.2 – Rede de distribuição de Baixa Tensão

O estudo efetuado considera uma rede de distribuição trifásica em Baixa Tensão, com uma tensão nominal de 400V. A rede apresenta uma topologia radial e está conectada à rede de distribuição MT através de um transformador de distribuição trifásico imerso em óleo. Para os parâmetros da linha de distribuição, é considerado que a linha é constituída por cabos subterrâneos de cobre, com secções de 70, 50 e 25 mm². Os valores obtidos para os cabos garantem um valor de tensão dentro dos limites legais, quando nenhum dos edifícios tem geração de energia, isto é, no Cenário 1. Isto requer um valor de amplitude de tensão, em qualquer ponto da rede, acima de 90% e abaixo de 110% do valor nominal, de acordo a norma NP EN 50160 [41]. Para compensar a queda de tensão ao longo da rede, o valor de tensão à saída do transformador de distribuição é definido 2% acima do seu valor nominal, como é prática comum nas redes de distribuição em Baixa Tensão. Adicionalmente, para replicar um conjunto típico de habitações convencionais, todos os edifícios estão distanciados 50 metros uns dos outros [42]. O valor de resistência dos cabos que conectam os edifícios à linha de distribuição é desprezado. A rede de distribuição considerada para o estudo é apresentada na Figura 4.5.

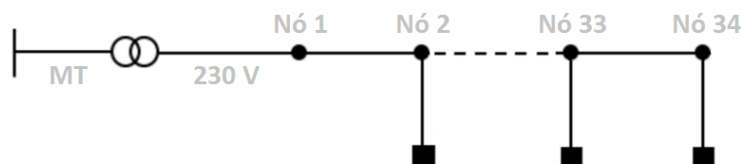


Figura 4. 5 - Rede de distribuição de Baixa Tensão considerada para o estudo

Os valores registados para os parâmetros de impedância da linha consideram diferentes secções e estão apresentados na Tabela 4.4.

Tabela 4. 4. Características da linha de distribuição

Nó da rede	Secção do cabo (mm ²)	Impedância da linha (Ω)
1 ao 12	70	0.0120
12 ao 24	50	0.0168
24 ao 34	25	0.0336

4.3 – Resultados

Os dados provenientes do estudo da RDBT considerada são apresentados e analisados neste subcapítulo. Todo o processamento de dados foi feito através da nZEBt, com base nas equações apresentadas no capítulo anterior. Para a elaboração dos gráficos foi utilizada a ferramenta Power BI [43]. Tendo em conta os distintos cenários e RDBT considerada, são apresentados resultados referentes ao perfil diário de carga da rede e aos indicadores de desempenho, isto é, o pico de potência no transformador, perdas de energia elétrica e perfil de tensão.

4.3.1 – Perfil diário de carga

A Figura 4.6 apresenta o perfil diário de carga médio da rede de distribuição BT, para ambos os cenários, tendo em conta 1 ano de simulação. Os valores apresentados na figura resultam da média do valor de potência aparente registado no nó 1 da rede de distribuição, em cada minuto, durante o ano de simulação considerado. O instante temporal utilizado para a obtenção do gráfico é de 1 minuto.

Relativamente ao Cenário 1, a RDBT apresenta um perfil diário de carga que reflete, aproximadamente, as atividades diárias dos seus residentes. Este perfil de carga é caracterizado por um reduzido consumo de energia durante a noite, seguido de um pico

de consumo durante as horas da manhã. Durante o dia, a figura mostra uma estabilização do consumo até ao meio da tarde, onde ocorre o segundo pico de consumo. Após o pico no início da noite, existe nova estabilização do consumo, seguida de uma queda do mesmo durante o período noturno.

No Cenário 2, quando todos os 33 edifícios são convertidos em edifícios nZEB, o perfil diário de carga é fortemente afetado durante o dia, devido à disponibilidade do recurso solar. A Figura 4.7 apresenta a influência da geração fotovoltaica no perfil de carga diário da rede. Desta forma, para cada instante, os valores de potência aparente do Cenário 2 são obtidos através da diferença entre os valores de potência aparente do Cenário 1 e os valores de potência fotovoltaica produzida. A introdução de sistemas fotovoltaicos na RDBT resulta em valores elevados de trânsito de potência no sentido inverso. Estes valores de potência tornam-se maiores, em módulo, do que os observados no pico da noite no Cenário 1. Devido à ocorrência do trânsito de potência no sentido inverso, o transformador de distribuição é forçado a funcionar como transformador de elevação de tensão e, desta forma, a rede de distribuição MT recebe energia da RDBT. Nos períodos do dia em que não existe produção fotovoltaica, não existem quaisquer diferenças no perfil diário de carga dos dois cenários.

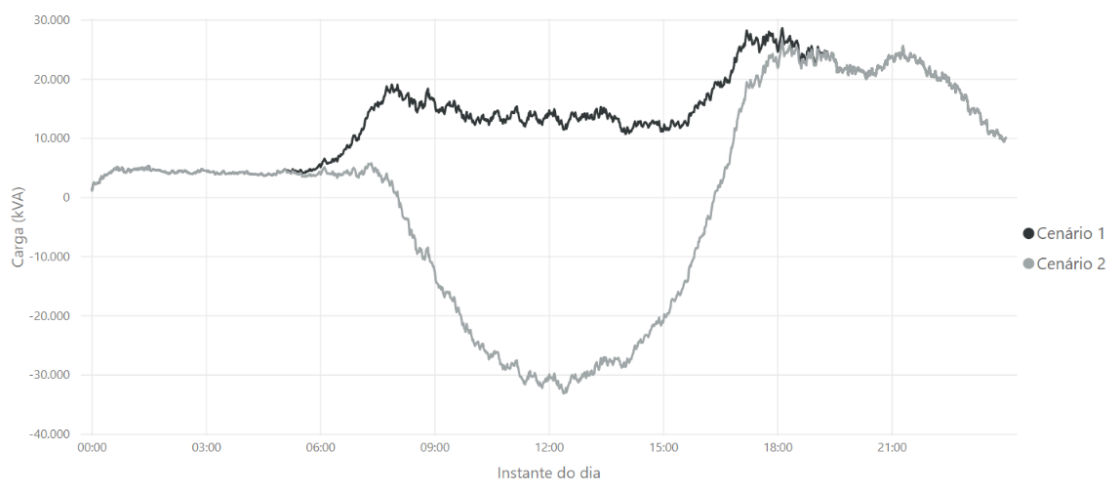


Figura 4. 6 – Perfil diário de carga médio da rede de distribuição de Baixa Tensão para ambos os cenários

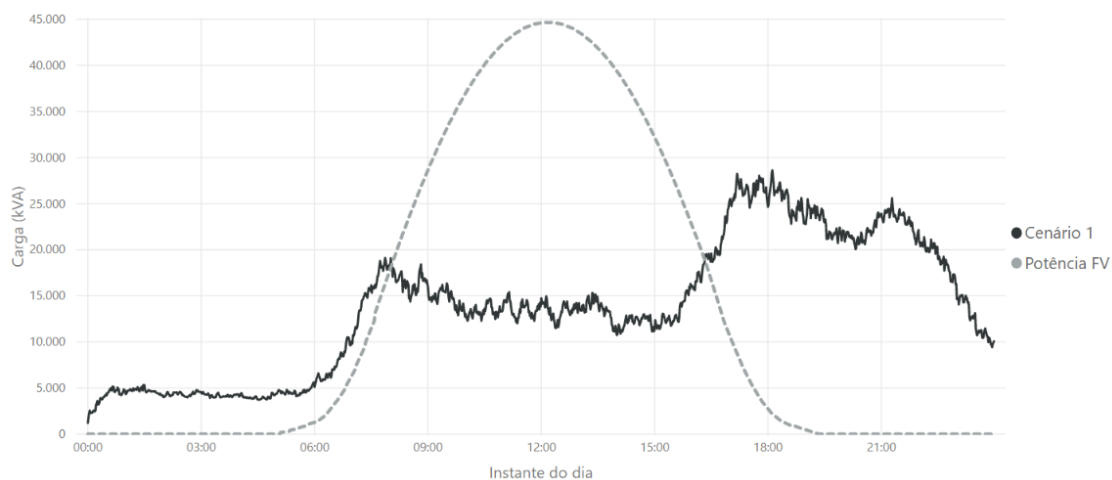


Figura 4. 7 - Perfil diário de carga média da rede de distribuição de Baixa Tensão (Cenário 1) e Potência fotovoltaica média gerada ao longo de um dia.

4.3.2 – Pico de potência

A Figura 4.8 considera a transição do Cenário 1 para o Cenário 2, apresentando o valor de pico de potência na saída do transformador de distribuição em função do número de edifícios convertidos em edifícios nZEB, para 1 ano de simulação. Para a obtenção desta figura foram consideradas as resoluções temporais de 1 e 15 minutos. O valor do pico de potência é um parâmetro importante no estudo das redes de distribuição elétrica, sendo necessário para, por exemplo, dimensionar os dispositivos de proteção. A figura demonstra que a introdução de edifícios nZEB na rede de distribuição leva a um aumento do valor do pico de potência no nó 1 da rede de distribuição.

Através da figura, verifica-se que, inicialmente, com uma pequena incidência de edifícios nZEB na RDBT, existe uma melhoria no desempenho da rede, no entanto, quando um maior número de edifícios são convertidos em nZEB, a rede atinge valores de pico de potência no transformador maiores do que os registados no Cenário 1. O valor máximo de pico de potência no transformador de distribuição ocorre quando todos os edifícios estão convertidos em nZEB (Cenário 2). Este fenómeno ocorre essencialmente durante a tarde, onde a produção excede o consumo, injetando energia na rede e originando, consequentemente, um trânsito de energia no sentido inverso. O valor máximo registado de pico de potência ocorre num dia típico do mês de Agosto, às 12:45h. A transição do Cenário 1 para o Cenário 2 levou a um aumento do pico de potência de 10.7% para a resolução de 1 minuto e 9.8% para a resolução de 15 minutos. A resolução

de 15 minutos introduz maior erro, devido ao facto de considerar a média do valor em 15 instantes, tornando-a menos sensível a determinadas variações do valor de pico de potência. Na Tabela 4.5 estão representados os valores do pico de potência no nó 1 da RDBT, bem como os instantes em que estes ocorrem, para a resolução de 1 minuto. Através da tabela conclui-se que, para o Cenário 1, o pico de potência ocorre, maioritariamente no final da tarde/início da noite. Para o Cenário 2 ocorre, essencialmente, perto do meio-dia solar, sendo este um período em que existe uma maior disponibilidade do recurso solar e, consequentemente, valores mais elevados de irradiância.

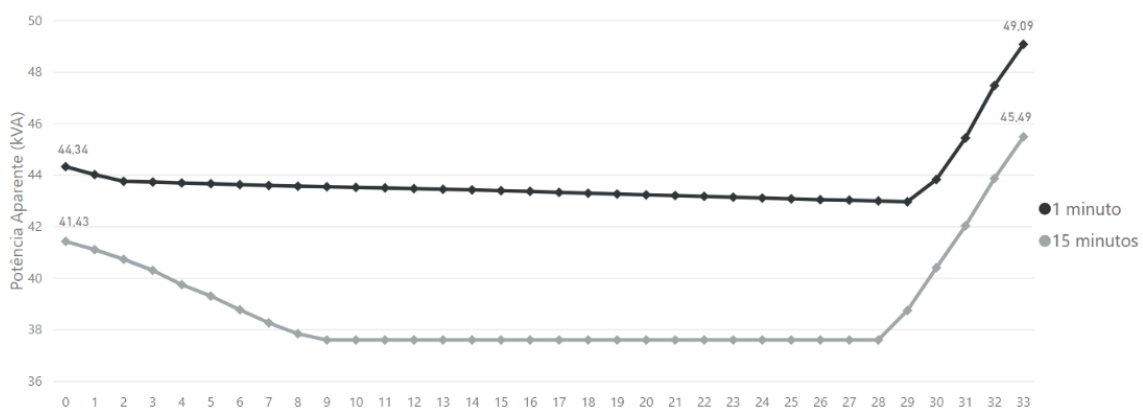


Figura 4. 8 - Pico de potência no nó de saída do transformador em função do número de edifícios convertidos em nZEB

Tabela 4. 5. Pico de potência no transformador de distribuição em cada mês, para ambos os cenários, e respetivos instantes (resolução de 1 minuto)

Mês	Cenário 1		Cenário 2	
	Valor [kVA]	Instante	Valor [kVA]	Instante
Janeiro	39.14	17:59	39.14	17:59
Fevereiro	43.81	17:27	42.85	17:27
Março	42.08	07:49	-42.66	12:23
Abril	42.98	18:16	-40.90	12:15
Maio	32.23	17:51	-41.16	10:48
Junho	33.99	17:13	-44.86	12:19
Julho	29.77	17:17	-43.68	13:08
Agosto	44.34	17:09	-49.09	12:45
Setembro	39.60	19:18	-45.54	12:46
Outubro	36.87	17:23	-36.07	12:28
Novembro	41.91	18:19	41.91	18:19
Dezembro	35.96	18:03	35.96	18:03

Os valores máximos do pico de potência no transformados para ambos os cenários e resoluções, bem como o mês e instante em que ocorrem, são apresentados na Tabela 4.6.

Tabela 4. 6. Valor, mês e instante do pico de potência no transformador para ambos os cenários e resoluções

	Cenário 1			Cenário 2		
	Valor [kVA]	Mês	Instante	Valor [kVA]	Mês	Instante
1 minuto	44.34	Agosto	17:09	-49.09	Agosto	12:45
15 minutos	41.43	Agosto	17:00	-45.49	Agosto	12:15

4.3.3 – Perdas por efeito de Joule

O valor anual de perdas de energia por efeito de Joule foi calculado para ambos os cenários e é apresentado na Figura 4.9. Na figura estão consideradas as resoluções temporais de 1 e 15 minutos. Os valores de perdas anuais foram obtidos através da Equação 3.10. Os resultados obtidos mostram que as perdas resistivas totais da rede são comparáveis ao valor anual de procura de carga de um único edifício (ver Tabela 4.2).

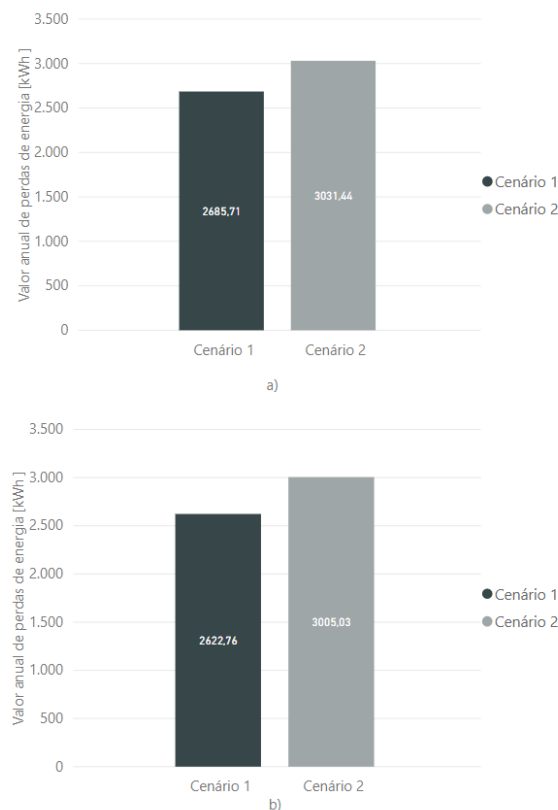


Figura 4. 9 - Perdas anuais de energia por efeito de Joule: Resolução de 1 minuto (a) e resolução de 15 minutos (b)

A Figura 4.10 considera a transição do Cenário 1 para o Cenário 2 e apresenta o valor anual de perdas de energia por efeito de Joule, em função do número de edifícios convertidos em nZEB. Através da figura, verifica-se uma melhoria inicial no desempenho da rede, que traduz uma diminuição das perdas. Contudo, ao converter um maior número de edifícios em nZEB, o trânsito de energia no sentido inverso torna-se predominante nas alturas do dia em que a geração excede o consumo e regista-se um aumento de 14.6% para a resolução de 1 minuto e 12.9% para a resolução de 15 minutos. Analogamente aos resultados obtidos para o pico de potência, a resolução de 15 minutos introduz maior erro no valor estimado de perdas.

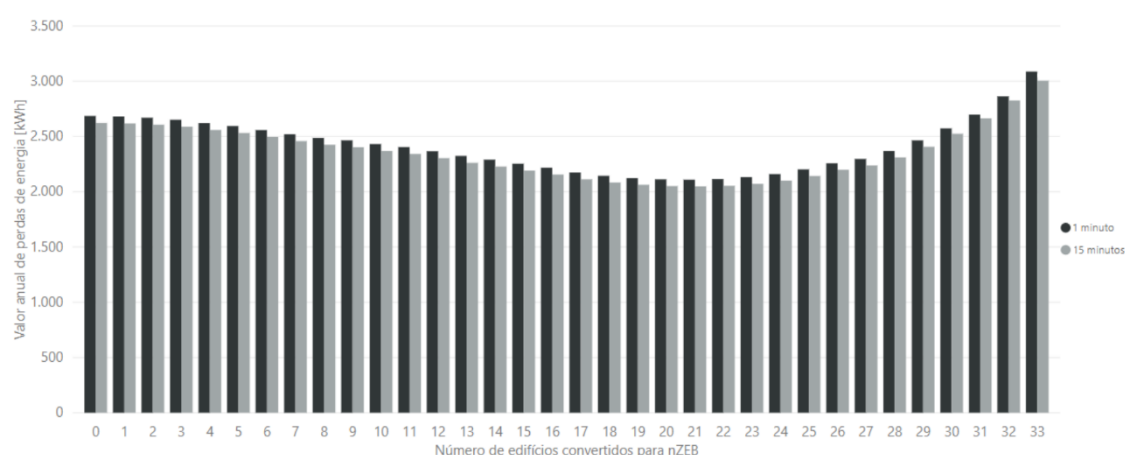


Figura 4. 10 – Perdas anuais de energia por efeito de Joule em função do número de edifícios convertidos para nZEB

Na figura 4.11 são apresentados os valores de perdas de energia por mês, considerando ambos os cenários. A resolução utilizada para a obtenção do gráfico foi de 1 minuto, visto que esta resolução introduz menor erro nos resultados obtidos. Através do gráfico conclui-se que nos meses em que existe menor disponibilidade do recurso solar, os edifícios nZEB contribuem para uma diminuição nos valores das perdas, como é possível verificar nos meses de Janeiro, Novembro e Dezembro. Contrariamente, nos meses em que os valores de irradiância solar são mais elevados, nomeadamente nos meses correspondentes à Primavera e Verão, constata-se um aumento significativo das perdas de energia, chegando este valor a ser 51.3% mais elevado (mês de Julho) do que o registado no Cenário 1, onde não existem edifícios nZEB. Na Tabela 4.7 são apresentados os valores totais de perdas de energia por mês, bem como a variação percentual referente à transição do Cenário 1 para o Cenário 2.

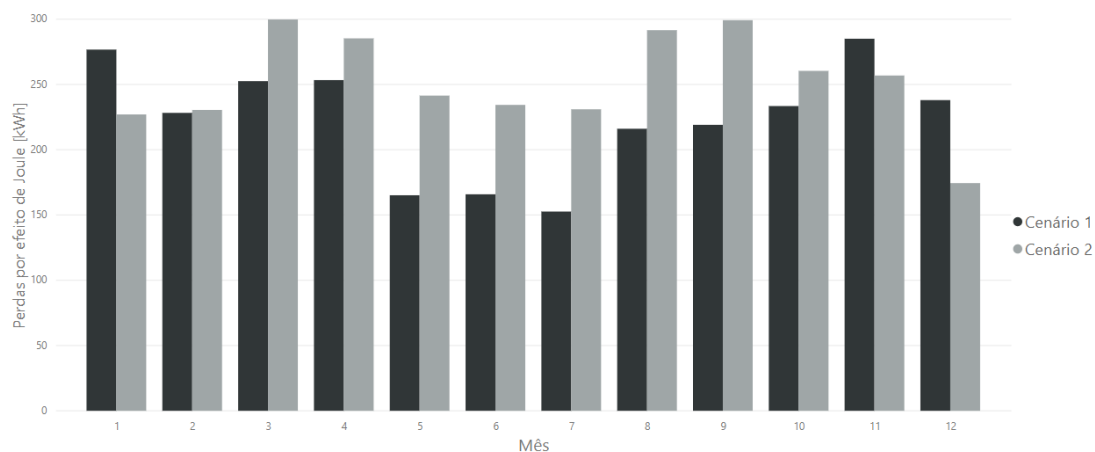


Figura 4. 11 - Perdas de energia por efeito de Joule em função do mês do ano

Tabela 4. 7. Valor mensal das perdas de energia e variação referente ao Cenário 1 (resolução de 1 minuto)

	Cenário 1	Cenário 2	Variação
Mês	Valor [kWh]	Valor [kWh]	Valor [%]
Janeiro	276.67	227.01	-18.0
Fevereiro	228.20	230.44	1.0
Março	252.50	299.72	18.7
Abril	253.31	285.27	12.6
Maio	165.10	241.43	46.2
Junho	165.83	234.31	41.3
Julho	152.62	230.95	51.3
Agosto	216.04	291.54	35.0
Setembro	219.03	299.20	36.6
Outubro	233.43	260.36	11.5
Novembro	284.10	256.82	-9.9
Dezembro	237.97	174.40	-26.7

A Figura 4.12 apresenta o valor de perdas de potência ativa num dia típico do mês de Julho. O gráfico foi obtido com uma resolução temporal de 1 minuto. Através da figura verifica-se que, nos instantes em que existem valores baixos de produção fotovoltaica, o Cenário 2 apresenta menores valores de perdas, quando comparado com o Cenário 1. Durante a tarde, altura em que existe maior exposição solar por parte dos edifícios, as perdas tornam-se predominantes no Cenário 2, chegando a atingir um valor de 1416.32W às 12:37h, comparativamente aos 50.34W registados no mesmo instante, no Cenário 1.

Nos instantes em que não existe incidência solar, os perfis de perdas são, naturalmente, iguais.

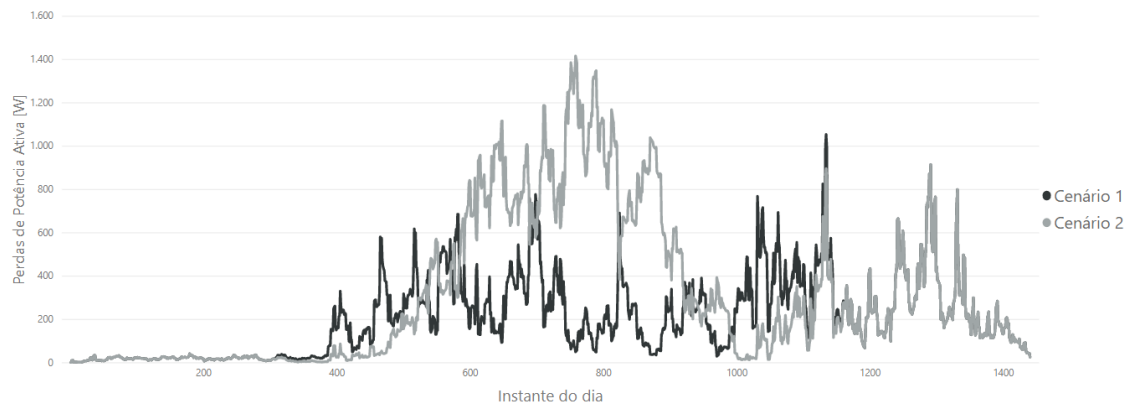


Figura 4. 12 - Perdas de Potência Ativa para um dia típico do mês de Julho

4.3.4 – Perfil de tensão

Quando a fonte primária de energia (solar) está disponível e todos os edifícios nZEB estão a gerar energia, o perfil de tensão é fortemente modificado e verifica-se um efeito crescente ao longo da rede. A Figura 4.13 apresenta o valor máximo de tensão registado em cada mês na RDBT, para o Cenário 2, sendo que este valor ocorre sempre no nó 34 (nó mais distante do transformador de distribuição). Através da figura, conclui-se que os meses em que a RDBT apresenta um maior valor de tensão correspondem aos meses de Verão. Na Tabela 4.8 são apresentados estes valores, bem como o instante em que os mesmos ocorrem.

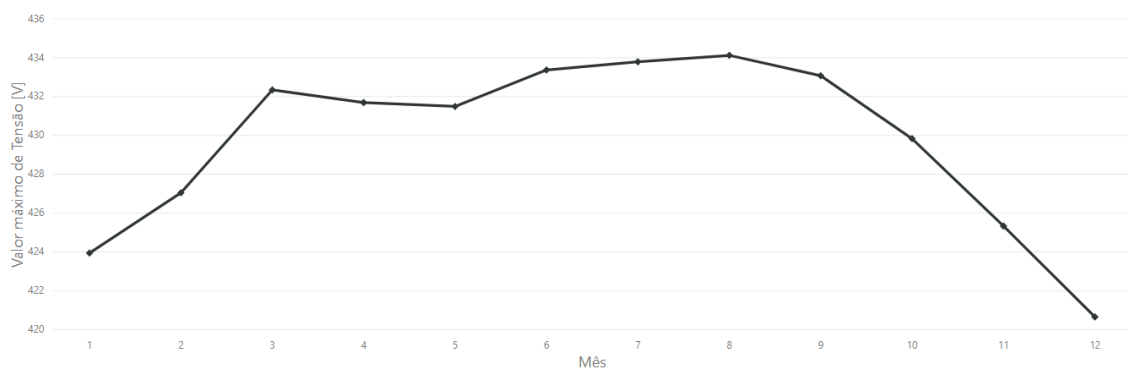


Figura 4. 13 - Valor máximo de tensão por mês

Tabela 4. 8. Valor máximo de tensão por mês e instante do dia

Mês	Tensão máxima [V]	Instante do dia
Janeiro	423,94	13:02
Fevereiro	427,04	11:43
Março	432,34	12:23
Abril	431,69	12:16
Maio	431,49	10:48
Junho	433,37	12:19
Julho	433,79	12:37
Agosto	434,12	12:45
Setembro	433,07	12:46
Outubro	429,83	12:01
Novembro	425,33	11:35
Dezembro	420,65	12:53

Os instantes do dia em que a tensão máxima é registada correspondem aos períodos de maior incidência solar. É num dia típico do mês de Agosto que se regista o valor máximo de tensão na RDBT. Este valor ocorre às 12:45h e representa um aumento de 8.5%, quando comparado à tensão nominal. Na Figura 4.14 apresenta-se o perfil de tensão da RDBT neste mesmo instante, considerando os Cenários 1 e 2.

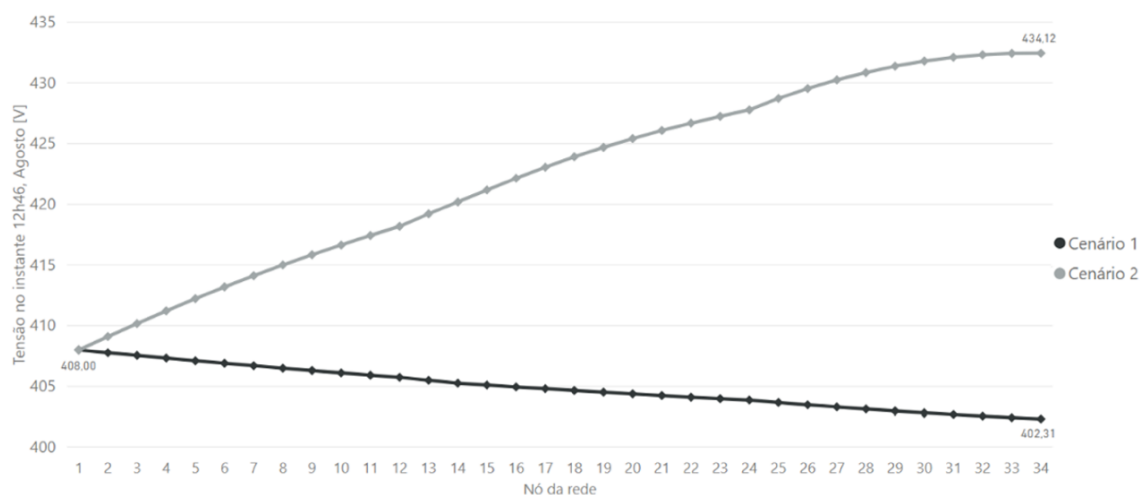


Figura 4. 14 - Perfil de tensão da rede de distribuição às 12:45h, no mês de Agosto

4.4 – Discussão

Inicialmente, o desempenho da rede de distribuição elétrica de Baixa Tensão melhora com a introdução de edifícios nZEB. Este efeito é verificado para o pico de potência e para as perdas anuais de energia, sendo que ambos diminuem com a integração dos primeiros edifícios nZEB na rede. Relativamente ao perfil de tensão, a integração de edifícios nZEB pode estabilizar o valor de tensão da rede, mantendo-o longe do valor mínimo admitido. Contudo, quando um maior número de edifícios nZEB é integrado na rede de distribuição observa-se um aumento da tensão ao longo da rede, sendo que o ponto mais distante do transformador de distribuição apresenta o valor máximo de tensão. Nos resultados obtidos, este aumento manteve-se dentro dos limites legais, isto é, abaixo dos 110% do valor da tensão nominal, no entanto podem existir casos em que este valor é ultrapassado, sendo necessário recorrer a *curtailment*. Para o pico de potência e perdas de energia, verifica-se o mesmo comportamento da rede, isto é, quando todos os edifícios são convertidos em nZEB, estes valores tornam-se maiores que os registados num cenário base, onde apenas estão conectados à RDBT edifícios convencionais (sem geração). Este efeito acontece devido à predominância do trânsito de potência no sentido inverso. Deste modo, existem instantes do dia em que, devido à disponibilidade solar e consequente produção fotovoltaica, os edifícios fornecem energia elétrica à rede de distribuição, transitando esta energia da rede de Baixa Tensão para a rede de Média Tensão. Este sentido inverso do trânsito de potência tem como consequência um aumento das perdas energéticas ao longo dos troços da rede, bem como um valor elevado de potência aos terminais do transformador. O elevado pico de potência no nó de saída do transformador pode causar o fenómeno de envelhecimento do mesmo. Para mitigar este efeito podem ser implementadas tecnologias de armazenamento de energia. Um sistema de armazenamento de energia, baseado em eletrónica de potência, é considerado no estudo [44] para mitigar os efeitos negativos introduzidos pelo trânsito de energia no sentido inverso no transformador de distribuição.

Relativamente à resolução temporal utilizada, constata-se que a resolução de 1 minuto espelha melhor os efeitos da introdução de edifícios nZEB numa rede de distribuição elétrica de Baixa Tensão. Devido ao facto da resolução de 15 minutos considerar apenas 4 instantes numa hora, existem variações de potência que não são

consideradas, levando a valores que não são os reais, originando erros na quantificação do pico de potência, perdas energéticas e perfil de tensão.

Conclusões e trabalhos futuros

O presente capítulo conclui a dissertação e apresenta as contribuições científicas da ferramenta desenvolvida. A investigação realizada originou a publicação de um artigo, presente no Anexo I, mencionado no presente capítulo. No final do capítulo são expostas sugestões de possíveis trabalhos futuros associados à extensão do desenvolvimento da ferramenta nZEBt.

5.1 – Síntese

Embora o efeito de estufa seja essencial para a manutenção da vida humana na terra, certas atividades humanas têm contribuído para a intensificação deste efeito, originando uma destabilização no equilíbrio energético do planeta. As emissões de gases com efeito de estufa aumentaram 35% de 1990 até 2010. Neste mesmo período, as emissões de dióxido de carbono, que representam cerca de 75% do total das emissões, aumentaram 42% [45].

Visto que os edifícios são responsáveis por 36% das emissões de dióxido de carbono na União Europeia [5], é de extrema importância melhorar a eficiência energética dos mesmos. Com a Diretiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu [4], a União Europeia fica mais perto de cumprir o compromisso de, até 2020, reduzir as emissões globais de gases com efeito de estufa em pelo menos 20 % em relação aos níveis de 1990, imposto pelo Protocolo de Quioto [46].

Por conseguinte, num contexto europeu, os estados-membros são estimulados a transformar edifícios convencionais em edifícios nZEB, aquando da renovação dos

mesmos. Deste modo, é impreterível ter uma ferramenta que permita estudar os impactos da introdução destes edifícios em redes de distribuição elétrica, garantindo, assim, que esta integração não se traduz numa diminuição da qualidade do serviço. Embora a elevada incidência de edifícios nZEB se possa traduzir em impactos negativos nas redes de distribuição elétrica, não deve existir qualquer limitação à integração dos mesmos, visto que o que está em causa é a utilização de fontes de energia renovável. Desta forma, é necessário existir um estudo adequado da rede que, através de medidas de mitigação, permita a integração de edifícios nZEB.

A ferramenta desenvolvida permite efetuar o estudo de uma RDBT tendo em conta um conjunto de fatores habitualmente não considerado, como sejam a possibilidade de introduzir nós da rede como edifícios do tipo nZEB ou ainda a hipótese de obter os seus diagramas de carga a partir de diferentes fontes (modelo de Richardson ou introdução de dados personalizados). Embora os resultados obtidos dependam de modelos já existentes (provenientes de estudos anteriores), o desenvolvimento da nZEBt agregou estes modelos, integrando-os numa única ferramenta. O tratamento automático da informação proveniente destes modelos permite, por exemplo, obter perfis diários de carga completos que consideram não só o consumo, mas também a geração fotovoltaica local, tornando assim desnecessário um processamento externo desta informação por parte do utilizador. Para além dos perfis diários de carga de cada edifício a ferramenta permite obter o trânsito de potência da RDBT considerada, bem como os indicadores de performance da mesma, permitindo ao utilizador quantificar os impactos provenientes da integração de edifícios nZEB na RDBT. A integração de diferentes resoluções temporais acrescenta versatilidade à ferramenta, permitindo, desta forma, a obtenção de perfis diários de carga com diferentes taxas de amostragem.

5.2 – Contribuições

A ferramenta desenvolvida permite determinar os impactos da introdução de edifícios nZEB numa qualquer RDBT. Para tal, possibilita ao utilizador criar diversos projetos que permitem definir diferentes redes de distribuição elétrica BT, podendo escolher a forma como define as cargas nos vários nós da rede. Estes projetos, bem como os resultados provenientes do estudo efetuado, podem ser guardados e acedidos posteriormente. Para a definição das cargas dos vários nós, o utilizador pode introduzir dados provenientes de entidades externas (através de simulação integrada na ferramenta)

ou introduzir dados personalizados, seguindo um formulário pré-definido. A nZEBt permite, ainda, a conversão de um edifício convencional num edifício nZEB (do ponto de vista elétrico), através da possibilidade de integrar sistemas de geração fotovoltaica que permitem obter um balanço anual energético nulo entre o consumo e a produção de energia (tal como preconizado pela definição de nZEB).

Desta forma, é possível fazer o estudo do comportamento da rede de distribuição elétrica ao longo de um dia, em função do número de edifícios nZEB na mesma, apresentando como resultados os impactos que advêm da integração destes edifícios. A nZEBt faz o estudo da rede ao longo dos vários instantes de um dia típico de um qualquer mês, permitindo ao utilizador quantificar os impactos provenientes da introdução de edifícios nZEB e em que instantes estes têm um maior impacto. Desta forma será possível estabelecer estratégias para mitigar estes efeitos.

A presente dissertação originou a publicação do seguinte artigo científico:

- R. Veríssimo, R. A. Lopes, J. Martins, *Energy Storage Systems to prevent distribution transformers overload with high NZEB penetration*. IEEE IECON 2018 Conference, 2018.

O manuscrito referente ao artigo científico supracitado encontra-se no Anexo I.

No Anexo II é apresentado o pacote de instalação da ferramenta, que contém toda a informação necessária para utilizar a nZEBt.

5.3 – Trabalhos futuros

Uma vez que a ferramenta nZEBt permite apenas a introdução de redes de distribuição radiais, expandir a mesma a redes malhadas acrescentará valor à ferramenta. Desta forma, será possível efetuar o estudo da incidência de edifícios nZEB em redes com diferentes topologias. Será também importante a possibilidade da nZEBt efetuar o cálculo das correntes de curto-circuito, possibilitando o estudo do impacto do aumento do número de edifícios nZEB no seu valor. A integração de uma componente gráfica que permita ao utilizador introduzir uma rede de distribuição e obter uma visualização da mesma seria também uma mais-valia para a ferramenta. Nesta visualização gráfica poderiam estar representados os resultados provenientes do trânsito de potência da rede, como os fluxos

de potência a transitar em cada troço, a tensão em cada nó da rede e os valores de procura de carga de cada um dos edifícios.

Bibliografia

- [1] L. Dogaru, «The Importance of Environmental Protection and Sustainable Development», *Procedia - Soc. Behav. Sci.*, vol. 93, pp. 1344–1348, 2013. doi: 10.1016/j.sbspro.2013.10.041.
- [2] N. Khetrpal, «Human Activities and Climate Change», *Encyclopedia of the Anthropocene*, pp. 401–408, Elsevier, 2018. doi: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10510-X.
- [3] Organização das Nações Unidas (ONU), «Protocolo de Quioto à Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Alterações Climáticas», *Diário da República I-A*, nº 71, 2002. Disponível em: <http://gddc.ministeriopublico.pt/instrumento/protocolo-de-quioto-convencao-quadro-das-nacoes-unidas-sobre-alteracoes-climaticas-17>. [Acedido: 22-Fev-2018].
- [4] Parlamento Europeu e Conselho da União Europeia, «Directiva 2010/31/UE do Parlamento Europeu e do Conselho, de 19 de Maio de 2010, relativa ao desempenho energético dos edifícios», *Jornal Oficial da União Europeia*, 2010. Disponível em: https://www.apambiente.pt/_zdata/DAR/Ar%20Interior/Diretiva_2010_31_UE_De_sempEnergEdifícios.pdf. [Acedido: 16-Fev-2018].
- [5] Comissão Europeia, «Buildings - European Commission». Disponível em: <https://ec.europa.eu/energy/en/topics/energy-efficiency/buildings>. [Acedido: 11-Fev-2018].
- [6] Direção Geral de Energia e Geologia, «National plan for increasing the number of nearly zero-energy buildings as required by Directive 2010/31/EU on the Energy Performance of Buildings (EPBD recast) – Portugal | Build Up», 2010. Disponível em: <http://www.buildup.eu/en/practices/publications/national-plan-increasing-number-nearly-zero-energy-buildings-required-4>. [Acedido: 11-Fev-2018].
- [7] Ministério da Economia e do Emprego, «Decreto-Lei 118/2013, 2013-08-20 - Diário da República Eletrónico», *Diário da República* nº 159/2013, Série I de 2013-08-20, 2013. Disponível em: <https://dre.pt/pesquisa/-/search/499237/details/maximized>. [Acedido: 22-Fev-2018].
- [8] Buildings Performance Institute Europe (BPIE), «nZEB definitions across Europe», 2015. Disponível em: <http://bpie.eu/publication/nzeb-definitions-across-europe-2015/>. [Acedido: 23-Fev-2018].
- [9] F. Cardoso, «Flexibilidade é o próximo passo para os edifícios eficientes», *Edifícios e Energia*, 2015. Disponível em: <http://www.edificioseenergia.pt/pt/noticia/flexibilidade-e-o-proximo-passo-para-os-edificios-eficientes3009>. [Acedido: 11-Fev-2018].
- [10] I. Sartori, A. Napolitano, K. Voss, «Net zero energy buildings: A consistent definition framework», *Energy Build.*, vol. 48, pp. 220–232, 2012. doi: 10.1016/j.enbuild.2012.01.032.

- [11] R. A. Lopes, «Extending nearly Zero-Energy Buildings Load Matching Improvement to Community-Level», Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Tese de Doutoramento, 2017. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10362/29113>.
- [12] H. Gonçalves, L. Aelenei, C. Rodrigues, «SOLAR XXI: A Portuguese Office Building towards Net Zero-Energy Building», *REHVA Journal*, 2012. Disponível em: <https://www.rehva.eu/fileadmin/hvac-dictio/03-2012/case1---solar-xxi.pdf>. [Acedido: 16-Fev-2018].
- [13] Ana Rute Ferreira, «Estudo de soluções de otimização para edifícios de balanço energético nulo», Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade Nova de Lisboa, Tese de Mestrado, 2012. Disponível em: https://run.unl.pt/bitstream/10362/8655/1/Ferreira_2012.pdf.
- [14] EnOB, «Net zero-energy buildings - Map of international projects.», 2013. Disponível em: <http://enob.info/en/net-zero-energy-buildings/nullenergie-projekte-wetweit/>. [Acedido: 16-Jan-2017].
- [15] I. Sartori, F. Noris, S. Herkel, «Cost analysis of nZEB/Plus energy buildings», *REHVA Journal*, 2015. Disponível em: https://www.rehva.eu/fileadmin/REHVA_Journal/REHVA_Journal_2015/RJ_issue_3/P.40/40-45_RJ1503_WEB.pdf.
- [16] C. Rodrigues, S. Viana, A. Silva, A. Joyce, H. Gonçalves, «Os Sistemas fotovoltaicos no edifício SOLAR XXI – Resultados», CIES 2006: XIII Congresso Ibérico e VIII Congresso Ibero-Americano de Energia Solar, 2006. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/261912588_Os_Sistemas_Fotovoltaicos_no_Edificio_Solar_XXI_-_Resultados.
- [17] International Energy Agency, Organisation for Economic Co-operation and Development, «The Power to choose: demand response in liberalised electricity markets», Paris, France: OECD/IEA, 2003. doi: 10.1787/9789264105041-en.
- [18] R. A. Lopes, A. Chambel, J. Neves, D. Aelenei, J. Martins, «A Literature Review of Methodologies Used to Assess the Energy Flexibility of Buildings», *Energy Procedia*, vol. 91, pp. 1053–1058, 2016. doi: 10.1016/j.egypro.2016.06.274.
- [19] G. Reynders, R. Amaral Lopes, A. Marszal-Pomianowska, D. Aelenei, J. Martins, D. Saelens, «Energy flexible buildings: An evaluation of definitions and quantification methodologies applied to thermal storage», *Energy Build.*, vol. 166, pp. 372–390, 2018. doi: 10.1016/j.enbuild.2018.02.040.
- [20] F. Cardoso, «Flexibilidade, a evolução natural dos NZEB», Edifícios e Energia, 2015. Disponível em: <https://docentes.fct.unl.pt/aelenei/links/flexibilidade-evolucao-natural-dos-nzeb-edificios-e-energia>. [Acedido: 11-Fev-2018].
- [21] R. A. Lopes, P. Magalhães, J. P. Gouveia, D. Aelenei, C. Lima, J. Martins, «A case study on the impact of nearly Zero-Energy Buildings on distribution transformer aging», *Energy*, vol. 157, pp. 669–678, 2018. doi: 10.1016/j.energy.2018.05.148.
- [22] M. Bollen, F. Hassan, «Integration of Distributed Generation in the Power System». Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, Inc., 2011. doi: 10.1002/9781118029039.

- [23] M. Thomson, D. G. Infield, «Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems», *IET Renew. Power Gener.*, vol. 1, n. 1, 2007. doi: 10.1049/iet-rpg:20060009.
- [24] D. Infield, F. Li, «Integrating micro-generation into distribution systems, a review of recent research», *2008 IEEE Power and Energy Society General Meeting - Conversion and Delivery of Electrical Energy in the 21st Century*, Pittsburgh, PA, USA, 2008. doi: 10.1109/PES.2008.4596874.
- [25] F. A. Viawan, F. Vuinovich, A. Sannino, «Probabilistic approach to the design of photovoltaic distributed generation in low volt-age feeder», *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2006. doi: 10.1109/PMAPS.2006.360272.
- [26] G. Pepermans, J. Driesen, D. Haeseldonckx, W. D'haeseleer, R. Belmans, «Distributed Generation: Definition, benefits and issues», *Energy Policy*, vol. 33, Issue 6, pp.787-798, 2005. doi: 10.1016/j.enpol.2003.10.004.
- [27] J. Kumar, S. Widergren, «Skills for power system software engineering: a vendor's perspective», *2001 Power Engineering Society Summer Meeting*, Vancouver, Canada, pp. 1083–1084 vol.2, 2001. doi: 10.1109/PESS.2001.970210.
- [28] L. Bam, W. Jewell, «Review: power system analysis software tools», *IEEE Power Engineering Society General Meeting 2005*, San Francisco, CA, USA, pp. 146–151, 2005. doi: 10.1109/PES.2005.1489097.
- [29] K. K. Kaberere, K. A. Folly, A. I. Petroianu, «Assessment of commercially available software tools for transient stability: experience gained in an academic environment», *2004 IEEE Africon. 7th Africon Conference in Africa*, Gaborone, Botswana, vol. ol.1, pp. 711–716, 2004. doi: 10.1109/AFRICON.2004.1406777.
- [30] S. Hay e A. Ferguson, «A Review of Power System Modelling Platforms and Capabilities», *IET Educational*, 2015. Disponível em: <https://www.theiet.org/sectors/energy/documents/modelling-3.cfm?type=pdf>.
- [31] G. Dupont, «Review of power system simulation software tools», *Dupont Energy Consulting GmbH*, 2013. Disponível em: <https://dupontconsulting.wordpress.com/2013/04/01/review-of-power-system-simulation-software/>. [Acedido: 13-Fev-2018].
- [32] Zhou Buxiang, Lin Nan, «Research on element architecture of power system analysis software», *2008 Third International Conference on Electric Utility Deregulation and Restructuring and Power Technologies*, Nanjing, China, 2008. doi: 10.1109/DRPT.2008.4523692.
- [33] L. Chen, H. Zhang, C. Li, H. Sun, «Modeling and Simulating Long-Timescale Cascading Faults in Power Systems Caused by Line-Galloping Events», *Energies*, vol. 10, n. 9, p. 1301, 2017. doi: 10.3390/en10091301.
- [34] Comissão Europeia, «JRC's Directorate C, Energy, Transport and Climate - PVGIS», 2012. Disponível em: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/>. [Acedido: 13-Set-2018].
- [35] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, C. Clifford, «Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model», *Energy Build.*, vol. 42, n. 10, pp. 1878–1887, 2010. doi: 10.1016/j.enbuild.2010.05.023.

- [36] D. L. Evans, L. W. Florschuetz, «Cost studies on terrestrial photovoltaic power systems with sunlight concentration», *Sol. Energy*, vol. 19, n. 3, pp. 255–262, 1977. doi: 10.1016/0038-092X(77)90068-8.
- [37] D. L. Evans, «Simplified method for predicting photovoltaic array output», *Sol. Energy*, vol. 27, n. 6, pp. 555–560, 1981. doi: 10.1016/0038-092X(81)90051-7.
- [38] J. A. Duffie, W. A. Beckman, «Solar engineering of thermal processes», 4th ed. Hoboken: John Wiley, 2013. doi: 10.1002/9781118671603.
- [39] W. H. Kersting, «Radial distribution test feeders», *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 6, n. 3, pp. 975–985, 1991. doi: 10.1109/PESW.2001.916993.
- [40] Instituto Nacional de Estatística (INE) e Direção Geral de Energia e Geologia (DGEG), «Inquérito ao consumo de energia no sector doméstico 2010», 2011. Disponível em: <https://www.ine.pt/>. [Acedido: 16-Fev-2018].
- [41] H. Markiewicz, A. Klajn «5.4.2 Standard EN 50160 Voltage Characteristics in Public Distribution Systems», *Leonardo Power Quality Initiative (LPQI)*, 2004. Disponível em: <http://www.cdtechnics.be/542-standard-en-50160-voltage-characteristics-in.pdf>.
- [42] R. Baetens *et al.*, «Assessing electrical bottlenecks at feeder level for residential net zero-energy buildings by integrated system simulation», *Appl. Energy*, vol. 96, pp. 74–83, 2012. doi: 10.1016/j.apenergy.2011.12.098.
- [43] Microsoft, «Power BI | Ferramentas do BI de Visualização de Dados Interativos». Disponível em: <https://powerbi.microsoft.com/pt-pt/>. [Acedido: 14-Ago-2018].
- [44] R. Veríssimo, R. A. Lopes, J. F. Martins, «Energy Storage Systems to prevent distribution transformers overload with high NZEB penetration», *IEEE IECON 2018 Conference*, 2018.
- [45] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), «Climate Change 2013 - The Physical Science Basis», Cambridge University Press, 2014. Disponível em: <http://www.ipcc.ch/report/ar5/wg1/>. [Acedido: 16-Ago-2018].
- [46] United Nations Framework Convention on Climate Change (UNFCCC), «Kyoto Protocol - Targets for the first commitment period», 2008. Disponível em: <https://unfccc.int/process/the-kyoto-protocol>. [Acedido: 17-Ago-2018].

Anexo I

Energy Storage Systems to prevent distribution transformers overload with high NZEB penetration

Renato Verissimo
DEE/FCT/UNL
Lisbon, Portugal
r.verissimo@campus.fct.unl.pt

Rui Lopes
DEE/FCT/UNL
CTS/UNINOVA
Lisbon, Portugal
rm.lopes@campus.fct.unl.pt

João Martins
DEE/FCT/UNL
CTS/UNINOVA
Lisbon, Portugal
jf.martins@fct.unl.pt

Abstract—This paper studies and analyses the impacts introduced on Distribution Transformer (DT) overload due to the integration of nearly Zero-Energy Buildings (nZEBs) into existing distribution Low Voltage Grids (LVG). The negative impacts on the DT are studied and explained. For high nZEB integration levels, this study reveals that the subsequent reverse power flows can achieve higher values, especially around noon, than the DT rated (and overload limit) power thus accelerating its aging. A power electronics based Energy Storage System (ESS) is considered to mitigate these negative effects. The paper also analysis the mitigation of the negative DTs impact by considering this ESS solution. The established control laws prevent the transformer to be exposed to excessive reverse power flow levels.

Keywords—energy storage system, NZEB, distribution transformer, low voltage grid

I. INTRODUCTION

One of the key targets of the European Union (EU) is to reduce by 88-91% its amount of CO₂-equivalent emissions by 2050, considering as background its 1990 values [1]. Buildings account for 40% of energy consumption and 36% of CO₂-equivalent emissions in the EU [2][3]. In order to minimize the ecological footprint and ensure a sustainable energy sufficiency this problem requires deep and major refurbishment and improvements of the building stock [4]. A key issue to solve this problem relies on the Nearly Zero Energy Buildings concept (NZEB). There are several NZEB definitions, however in this paper the following will be considered: “nearly zero-energy building means a building that has a very high energy performance (...). The nearly zero or very low amount of energy required should be covered to a very significant extent by energy from renewable sources, including energy from renewable sources produced on-site or nearby” [5]. The EU Energy Performance in Buildings Directive (EPBD) mandates that all new buildings, built from 2021 onwards, should be at least NZEB [5]. Furthermore, this same directive endorses EU member states to set specific targets in order to encourage the conversion of regular buildings into NZEB whenever those are subjected to some kind of renovation. It is expected that the adoption of this recommendation will enlarge the NZEB adoption in several countries, particularly on those where large numbers of old buildings need rehabilitation interventions. In the EU, the majority of the buildings are more than 30 years old and about 35% are more than 60 years old. As an example, in Portugal about 50% of the building stock is more than 30 years old [6].

On a simpler formulation one can state that a NZEB is a building presenting a nearly zero annual balance between energy demand and on-site energy production. Being this

computation taken on an annual basis the real time computation is obviously non zero. Considering a household with the typical load diagram presented in Fig. 1, located in the centre of Portugal, a 1.8 kW solar panel is needed in order to consider this household as NZEB. In Fig. 1, the black line denotes the home consumption and the grey line denotes the on-site PV power production.

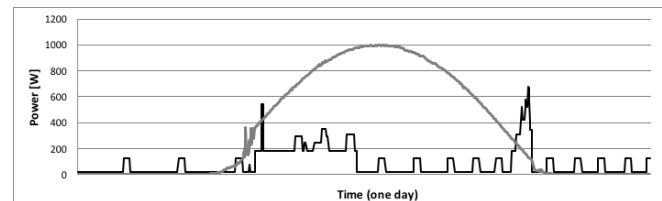


Fig. 1. Household typical load diagram

With this PV panel installed, the NZEB will present a seasonal grid interaction behaviour. The overall import/export energy computation is nearly zero, but there is a clear mismatch producing a net export in the day time and a net import in the rest of the day, as can be seen in Fig. 2 where the net balance is presented.

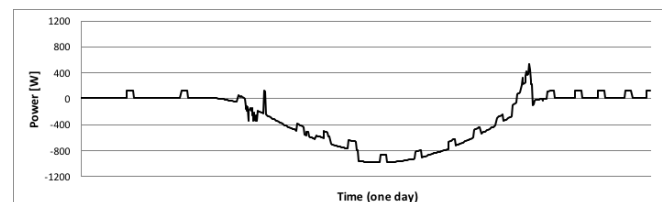


Fig. 2. Monthly load and generation

As can be seen in Fig. 2, the household reverse energy flow can achieve higher values than the direct flow. It is important to note that these households are integrated on a low-voltage grid (LVG) where Distribution Transformers (DT) are usually design in order to meet the maximum load on the grid (with some security factor). With daily net energy unbalance the distribution transformer must also be able to handle this reverse flow upstream from the LVG end-users. By end-users one considers the several NZEB spread around the low voltage grid. The introduction of NZEB (considering the adaptation of the EPBD directive) implies the introduction of new distributed generation into already existing LVGs, whose DTs were originally designed to deal only with unidirectional power flows. This NZEB introduction will create impacts which depend on the amount of distributed generation and also on the used power

electronics interface [7]. Furthermore the DTs' aging can be highly increased [8][9].

This paper studies the effects of increasing NZEB penetration on LVG, particularly on the DTs overload. It also proposes an energy storage based solution in order to mitigate the negative impacts that increasing NZEB penetration have on the DT. The remaining of this paper is structured as follows: Section 2 addresses LVGs with high penetration of NZEBs, Section 3 details the Energy Storage based solution, Section 4 presents a case study and Section 5 presents conclusions and future work.

II. LVGS WITH HIGH NZEB PENETRATION

Low voltage distribution grids are historically design in such a way that the power flow is considered to occur from the medium voltage grid towards the low voltage grid and thus feeding end user consumers [10]. The recent integration of distributed generation systems (particularly PV systems) in the low voltage grids has cause serious problems on the behaviour of the traditional distribution feeders. Being a good solution from the energy sustainability point of view, low voltage PV systems can also impose several negative impacts on the electrical system, particularly if their penetration level is high. These PV systems can go from small (less than 10kW) to intermediate (10-500kW), which are both usually installed at the distribution level (low voltage). Large PV systems (higher than 500kW) are usually installed at the transmission system level.

As mentioned in the previous section, when converting a regular building into the NZEB concept makes this building to act as a prosumer. The usual addition of PV systems makes it to act as consumer/producer in different times of year, month or day. The analysis of the NZEB impact on the LVG is more complicated than the analysis of the impact of distributed PV systems, because in the NZEB case one has to consider, not only the solar radiation, but also the occupancy and load profiles. This makes this analysis a stochastic one because occupancy is not as deterministic as solar radiation. However, taking into account the net balance, when exporting to the grid a NZEB can cause the same negative impacts as a non-integrated PV production system.

Many authors have studied the possible negative impacts of distributed generation penetration. With a high distributed generation penetration degree one can observe reverse power flow in the LVG, overloading distribution feeders and increasing power losses [11]. This reverse power flow can lead to an overvoltage effect along the distribution feeders [12]. Distributed generation systems (and also NZEBs) can increase load match thus reducing energy distribution losses. However, this is only true if reverse power flow does not occur. Also the existence of more than one power injection node will cause controllability problems on the LVG. Single-phase distributed generation systems surely will cause phase unbalance on the three-phase LVG. Although some advanced PV inverters automatically balance the load they are only suitable for three-phase PV systems [13], which is not the case of most households. PV power electronic converters, although getting better every time, often cause harmonics' problems on the LVG. Since most of the small and intermediate distributed generation systems do not perform reactive power injection (although some of them are able to most of the contracts do not foresee that in LVG) the power factor lowers in the LVG affecting the DTs efficiency [14].

A major negative impact of distributed generation penetration, and in particular of the foreseen increasing number of NZEB buildings as LVG loads, is the excessive aging of Distribution Transformers due the existence of reverse power flow higher than their rated power. As mentioned Distribution Transformers are usually design in order to meet the maximum load on the grid not considering the existence of reverse power flow. However, this reverse power flow can be occasionally higher than the DTs' power rate. This negative impact can become dangerously severe if one considers that all buildings in the LVG feeder are sustainable being converted into NZEB. Then, it is not only the impact of one building (with its reverse power flow) but one has to consider this negative impact emerging from all nodes on the LVG.

Furthermore, when several buildings in the same LVG are converted into NZEB one has to consider the effects of load and generation coincidence. If the loads of an aggregation of NZEBs can be considered stochastic, thus smoothing the overall load, the can not be considered for their PV generation, because this has a simultaneous occurrence effect [15].

As detailed in the flowing sections this negative impact on the Distribution Transformer can be mitigated with a centralized energy storage system based solution.

III. CASE STUDY

The case study presented in this paper focus a LVG located in Lisbon, Portugal, supplying 33 buildings and aims to: i) show the impact introduced by the NZEBs' on-site generation on the transformer's load; and ii) study the operation of a power electronics based Energy Storage System (ESS) to mitigate transformer's overload when a relatively high level of NZEBs integrate the LVG. To address the first objective, different scenarios are considered, being the difference between scenarios related with the number of original buildings converted to NZEB using on-site PV generation (i.e. one additional building converted to NZEB per scenario). The baseline scenario refers to a neighborhood composed only by regular buildings that do not generate energy on-site. To address the second objective, an extra scenario is used, where all the 33 buildings are NZEBs and an ESS is integrated to mitigate transformer's overload. This ESS is located at the transformer's output and, from the transformer's point of view, is seen as a consumption device when charging and as a virtual generation device when discharging. The main objective is to charge the ESS during periods with reverse power flow values higher than a predefined limit and to discharge it when demand is higher than generation. Another possibility was to consider distinct ESS along the LVG, each one of them integrated into each NZEB, considering energy router based solutions [16] or multiport interface based solutions [17]. However, this is not the best solution when small scale microgrids (as this 33 use case LVG) are considered. For this study a standard AC/DC bidirectional power electronics converter was considered as gateway between the transformer's output and the energy storage system, denoted as ESS in Fig. 3.

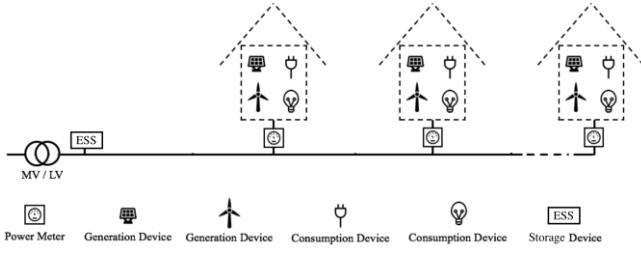


Fig. 3. Use case NZEB LVG.

For all the considered scenarios, 1-year simulations are carried out using 15-min resolution data and one representative day per month. Additionally, each building's load diagram refers to the difference between building's demand and on-site PV generation profiles (when converted to NZEB). In this study, Richardson's model is used to generate the demand profiles of each 24-h load cycle [18]. To collect each demand profile, appliances were randomly allocated to the dwellings and an occupancy model was considered for each building [19]. Due to this occupancy dependence, the probability that some devices have to operate depends on the number of occupants of the respective building. Therefore, the electricity demand of a specific building is also dependent on its number of occupants, as well as if it is a weekday or a weekend. It was considered that the simulation took place during week days and that the number of residents in each building vary from 1 to 5. To set the number of occupants for each building, a uniform distribution was used. Regarding the on-site PV generation profile, the tool provided in [20] was used. In order to convert the global irradiance on a fixed plane with optimized inclination and azimuth to active power, considering also the average daytime temperature profile, a nominal operating cell temperature (NOCT) of 45°C and a temperature coefficient of the maximum output power (at STC conditions) of -0.45 %/°C were considered for all buildings. The ESS power electronics converter efficiency value was set to 97% and it was also assumed installation losses of 15%. In each building converted to NZEB, the installed peak power was linearly scaled in order to occur a net-zero energy balance over the analyzed year (i.e. the amount of energy generated on-site equals the building's energy demand). The main characteristics of each building are presented in TABLE I., focusing their position in the LVG, the considered number of occupants, the annual energy demand and the installed peak power in order to convert each building to NZEB.

TABLE I. TABLE TYPE STYLES

LVG's node	Number of Occupants	PV peak power [kW]
1	1	1.31
2	1	1.54
3	1	1.70
4	2	2.07
5	3	2.44
6	3	2.29
7	2	2.44
8	5	2.24

9	3	2.15
10	1	1.62
11	2	1.79
12	2	2.16
13	2	2.04
14	1	1.69
15	3	2.17
16	4	2.80
17	5	2.65
18	1	2.03
19	3	1.78
20	5	2.89
21	4	2.67
22	3	2.50
23	4	2.21
24	4	2.75
25	5	2.91
26	2	1.84
27	4	2.48
28	5	2.76
29	4	2.27
30	3	2.16
31	5	2.72
32	4	2.23
33	5	2.88

IV. RESULTS AND ANALYSIS

This section starts by addressing the results related with the neighborhood composed by only regular buildings, which do not generate energy on-site (i.e. the baseline scenario). Then, results associated with the conversion of regular buildings to NZEB are presented and analyzed. Lastly, the impact introduced by the ESS is assessed, assuming that the proposed system is integrated into the LVG (at transformer output) when all buildings are NZEBs in order to mitigate transformer's increased overload.

A. Baseline Scenario

The load profile of the studied LVG, measured at distribution transformer's output, typically follows a 24 h duration cycle. As presented in Fig. 4, which shows the load profile at transformer's output for each representative day of each month, the original load cycles are characterized by a reduced power consumption value during night followed by a morning peak at breakfast time. During the day, the load profiles show a relatively leveled power consumption, until mid-afternoon, when it rises towards the evening peak. After this second peak, LVG's electricity demand falls again reaching the night-time lower values.

According to IEC 60076-7 standard [21], normal operation of a distribution transformer is compatible with loads up to 50 % above the respective rated load. Therefore, considering the results presented in Fig. 4, a 24.9 kVA transformer would be needed to guarantee a normal operation during the considered year, since the registered yearly peak load was 37.3 kVA. In terms of transformer aging, such overloading is normally allowed in distribution grids because operation periods above the rated load are compensated by other periods with load values lower than

the rated one [21]. This is clearly illustrated in Fig. 4, where, for instance, night time load values are much lower than the ones registered during evening.

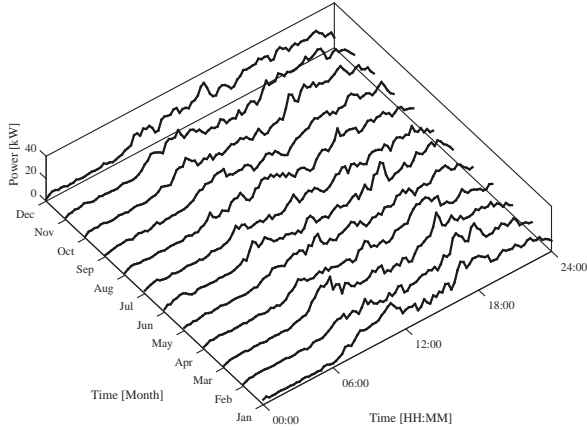


Fig. 4. LVG's load at distribution transformer's output for the baseline scenario.

B. Increasing NZEB Penetration

The integration of PV-based energy conversion systems, in each building converted to NZEB, considerably impacts the presented 24 h duration load cycles. These impacts are registered during daytime, when the solar resource is available, and strongly depend on the number of buildings converted to NZEB. To illustrate the impacts introduced on LVG's load, Fig. 5 presents the yearly peak load at transformer's output. This figure shows that the introduced impacts can be both positive and negative, depending on the number of buildings converted to NZEBs. For a reduced number of converted buildings, the yearly peak load decreases, reaching a minimum of 35.5 kVA when 13 NZEBs integrate the LVG. This is due to the magnitude reduction of the load profiles during daytime, even in the presence of reverse power flow. From 13 to 30 NZEBs, no further reduction is achieved since the resulting peak load occurs during the evening, despite the significant load reduction around noon. When more than 30 buildings are converted to NZEB, yearly peak load values increase until reaching a maximum of 40.7 kVA, when the 33 buildings achieve the NZEB condition. This yearly peak load increasing is due to the coincident on-site generation of the NZEBs, which results on reverse power flows with magnitudes higher than the evening related demand peak loads.

The combined household reverse energy flow achieves higher values than the direct flow, at transformer's output. This impact can change day-by-day depending on the PV generation and on the stochastic load behaviour (highly depended on the external temperature and user behaviour). This means that one can achieve lower or much higher negative impacts (comparing with the ones presented here) depending on this stochastic behaviour.

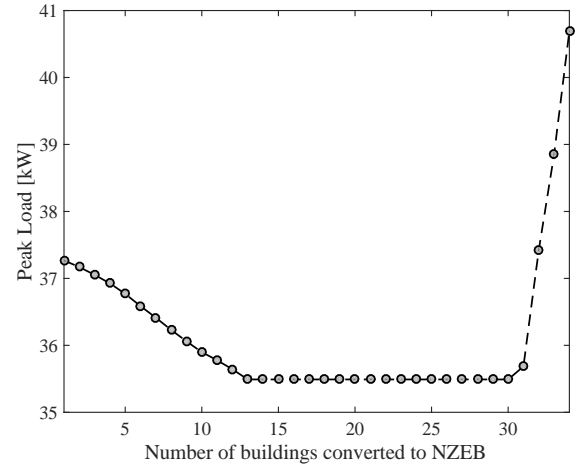


Fig. 5. LVG's yearly peak load.

Fig. 6 presents the LVG's load at transformer's output during the analyzed year for the most problematic scenario in terms of yearly peak load (i.e. when all buildings are in a NZEB condition). The impacts introduced by the coincident PV generation are evident. In this case, transformer's load achieves values higher than the maximum obtained for the baseline during July, August and September. Therefore, comparing to the baseline scenario, a 24.9 kVA transformer would be exposed to load values beyond the limit for a normal operation, which could result on transformer permanent failure or excessive aging due to thermal stress [22].

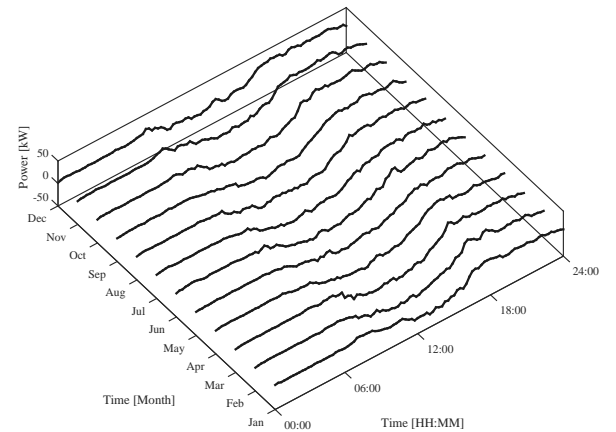


Fig. 6. LVG's load measured at distribution transformer's output when the 33 buildings are converted to NZEBs.

C. Energy Storage based solution results

This section presents the obtained results when the ESS installed at the transformer's output is used to mitigate the negative impacts introduced on the distribution transformer's load by the conversion of regular buildings to NZEBs. The worst case scenario, when all the 33 buildings are converted, is considered. The 24.9 kVA transformer, associated to a normal operation for the baseline scenario, is

assumed to integrate this LVG. The ESS control algorithm is established in order to prevent the overload of the distribution transformer. In this way the power electronics converter should obey the following rules:

- In presence of excess reverse power flow, the power electronics convert should re-direct this excess into the energy storage system;
- No charge or discharge will be performed when the imported/exported power is within distribution transformer operating limits;
- The energy storage system will inject power whenever energy is being imported from the grid or whenever the DSO asks for a consumption reduction (possible ancillary services provided by the microgrid).

Fig. 7 presents the load profile of the integrated ESS, where a positive/negative value is associated with a charging/discharging behavior. The system operation in July, August and October is evident, with charging periods around noon and discharging at early evening when the LVG's demand exceeds the generation. During the remaining of the year, the ESS does not exchange energy with the LVG since the transformer's load limit is respected. To achieve the presented results a 2.8 kWh battery would be necessary, with a charging peak power of 3.4 kW. It is important to note that this battery capacity can be lower than the sum of 33 household batteries, considering the stochastic load behaviour. Although a coincident behaviour occurs the stochasticity of the load implies small deviations on the individual peaks.

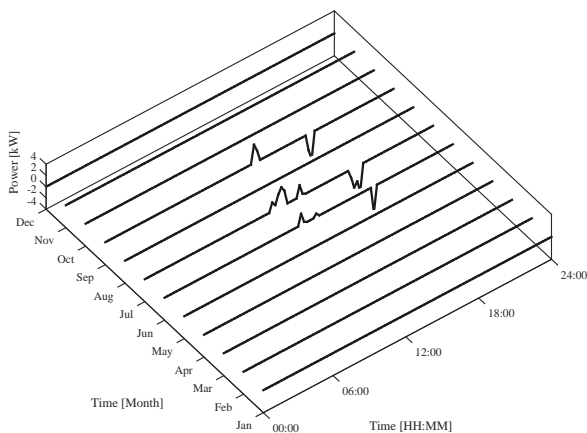


Fig. 7. Load profile of the integrated Energy Storage System.

V. CONCLUSIONS

The study reported in this paper addresses the impacts introduced on distribution transformers' load due to the integration of NZEBs into existing LVGs. Moreover, this study analyses and proposes an Energy Storage System to mitigate transformer overloading due to reverse power flows.

To perform this evaluation, a LVG feeding 33 buildings is considered. The impacts introduced by integrating NZEBs into this LVG are assessed using several scenarios with distinct NZEB penetration levels. Then, assuming a worst case scenario in terms of transformer overloading, an Energy Storage System is integrated at transformer's output to mitigate the negative impacts.

Results show that for a reduced NZEB penetration level, transformer's yearly peak load decreases due to the local generation. However, for high penetration levels, the coincident PV generation, used by the buildings to achieve a net-zero energy status over a 1-year period, creates reverse power flows whose magnitudes achieve higher values than the evening demand peaks. For the worst case scenario, when all the 33 buildings are converted to NZEBs, the collected results reveal that the integrated Energy Storage System is effective in mitigating transformer overloading by storing the excessive generation to latter discharge when demand increases.

Since, in the case of NZEBs using PV generation, transformer overloading is found to occur mostly around noon, the integrated Energy Storage System could also be used to achieve distinct objectives during other periods of the day, instead of not being operated most of the time. For instance, local generation could be stored afternoon to reduce evening demand peak loads, even in days with no transformer overloading due to reverse power flows.

REFERENCES

- [1] European Commission. Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions - A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050. 2011.
- [2] S. Deng, R.Z. Wang, Y.J. Dai, How to evaluate performance of net zero energy building – A literature research, *Energy*. 71 (2014) 1–16.
- [3] M. Santamouris, D. Kolokotsa, Passive cooling dissipation techniques for buildings and other structures: The state of the art, *Energy and Buildings*. 57 (2013) 74–94.
- [4] E. Pyloudi, S. Papantoniou, D. Kolokotsa, Retrofitting an office building towards a net zero energy building, *Advances in Building Energy Research*. (2014) 1–14. doi:10.1080/17512549.2014.917985.
- [5] European Union. Directive 2010/31/EU of the european parliament and of the council of 19 may 2010 on the energy performance of buildings (recast). Off J Eur Union 2010.
- [6] PORDATA. Edifícios segundo os Censos: total e por época de construção (in Portuguese) 2017. <http://www.pordata.pt/DB/Portugal/Ambiente+de+Consulta/Tabela> (accessed July 14, 2017).
- [7] M. Bollen, F. Hassan. Integration of Distributed Generation in the Power System. IEEE Press; 2011.
- [8] Lopes RA, Magalhães P, Gouveia JoãoPedro, Aelenei D, Lima C, Martins João, A case study on the impact of nearly Zero-Energy Buildings on distribution transformer aging, *Energy* (2018)
- [9] Lopes RA, 2017, "Extending nearly Zero-Energy Buildings Load Matching Improvement to Community-Level", doctoral thesis, DEE FCT-NOVA, retrieved from <http://hdl.handle.net/10362/29113>.
- [10] Pathomthat Chiradeja, R. Rmakumar "An approach to qualify the technical benefits of distributed generation" *Energy Conversion*, IEEE Transactions on, vol.19, no.4, pp.764,773, Dec. 2004.
- [11] M. Thomson and D. G. Infield, "Impact of widespread photovoltaics generation on distribution systems," in *IET Renewable Power Generation*, vol. 1, no. 1, pp. 33–40, March 2007.
- [12] S. Eftekharnajad, V. Vittal, G. T. Heydt, B. Keel and J. Loehr, "Impact of increased penetration of photovoltaic generation on power systems," in *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, no. 2, pp. 893–901, May 2013.
- [13] V. F. Pires, O. Husev, D. Vinnikov and J. F. Martins, "A control strategy for a grid-connected PV system with unbalanced loads compensation," *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, Costa da Caparica, 2015, pp. 154–159.
- [14] B. Kroposki, DG Power Quality, Protection and Reliability Case Studies Report, Report No. NREL/SR-560-34635, National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, 2003.

- [15] Rui Amaral Lopes, João Martins, Daniel Aelenei, Celso Pantoja Lima, A cooperative net zero energy community to improve load matching, *Renewable Energy*, Volume 93, 2016, Pages 1-13
- [16] V. F. Pires, O. Husev, D. Vinnikov, and J. F. Martins, "A control strategy for a grid-connected pv system with unbalanced loads compensation," in *2015 9th International Conference on Compatibility and Power Electronics (CPE)*, June 2015, pp. 154–159.
- [17] I. Roasto, A. Rosin, and T. Jalakas, "Power electronic interface converter for resource efficient buildings," in *IECON 2017 - 43rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society*, 2017, pp. 3638–3643.
- [18] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, C. Clifford, Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model, *Energy Build.* 42 (10) (2010) 1878e1887.
- [19] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, A high-resolution domestic building occupancy model for energy demand simulations, *Energy Build.* 40 (8) (2008) 1560e1566.
- [20] Huld, T., Šuri, M., Dunlop, E., Albuisson, M., Wald, L., 2005, Integration of HelioClim-1 database into PVGIS to estimate solar electricity potential in Africa. Proceedings from 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6-10 June 2005, Barcelona, SpainSdsd
- [21] IEC, 2015, "60076-7 loading Guide for oil-immersed power transformers".
- [22] Lopes RA, Magalhães P, Gouveia JoãoPedro, Aelenei D, Lima C, Martins João, A case study on the impact of nearly Zero-Energy Buildings on distribution transformer aging, *Energy* (2018)

Anexo II



Pacote de instalação nZEBt

Com o intuito de determinar os impactos da introdução de edifícios nZEB na rede de distribuição elétrica de Baixa-Tensão, a nZEBt (nZEB tool) permite ao utilizador introduzir uma rede, assim como os parâmetros da mesma, e o perfil diário de carga de cada um dos edifícios ligados aos nós da referida rede. Através da nZEBt é, ainda, possível converter estes edifícios em edifícios nZEB. A ferramenta considera um dia típico de um mês e a localização em que a rede de distribuição está inserida.

Desta forma, é possível fazer o estudo do comportamento da rede de distribuição elétrica ao longo de um dia, à medida que são introduzidos edifícios nZEB na referida rede, apresentando como resultados os impactos que advêm da integração de edifícios deste tipo. Para tal, a ferramenta obtém o trânsito de potência da rede e reporta os potenciais impactos através da geração de ficheiros com informação referente à rede estudada. Os impactos a reportar são relativos a problemas de sobrecarga, perdas energéticas e perfil de tensão. Para a obtenção dos diagramas diários de carga, o utilizador pode escolher a resolução temporal de 1 ou 15 minutos.

Pacote de instalação nZEBt



O pacote de instalação da nZEBt é constituído por dois ficheiros executáveis, um de instalação e outro para iniciar a ferramenta, dois ficheiros que contêm o formulário para a introdução dos dados de carga e da rede e, ainda, o ficheiro que contém o Modelo de Richardson^[1]. Adicionalmente, o pacote inclui um ficheiro *Readme*, que fornece a orientação necessária à utilização da ferramenta.

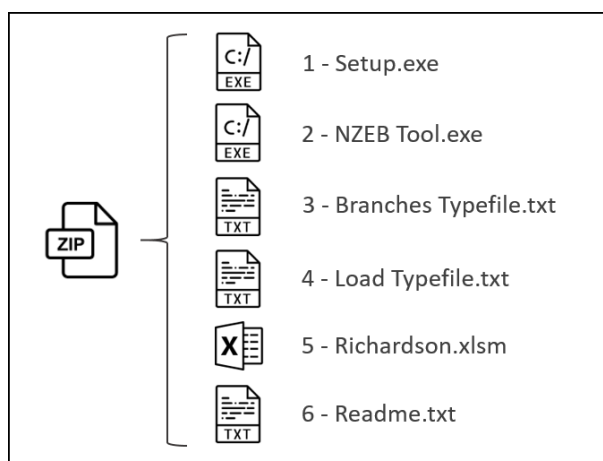


Figura 1 - Pacote de instalação nZEBt

Para obter o pacote de instalação da nZEBt contacte o autor através do seguinte endereço de e-mail:

r.verissimo@campus.fct.unl.pt

[1] I. Richardson, M. Thomson, D. Infield, e C. Clifford, «Domestic electricity use: A high-resolution energy demand model», *Energy Build.*, vol. 42, n. 10, pp. 1878–1887, Out. 2010.